



République du Bénin

@@@@@

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche

Scientifique

@@@@@

Université d'Abomey-Calavi (UAC)

@@@@@

Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC)

@@@@@

Centre Autonome de Perfectionnement (CAP)

*Thème*

**Conception et Réalisation d'un générateur d'électrophorèse**

*Rédigé et soutenu par :*

**HOUNGBEME Dossou Christian**

*Sous la supervision de :*

**Encadreur**

DIDAVI Audace

*Docteur en Génie Electrique*

**Maitre Mémoire**

AGBOMAHENA Macaire

*Professeur Titulaire des Universités du CAMES*

*Enseignant-Chercheur à l'EPAC-UA*

*Année académique : 2022-2023*

## Sommaire

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Sommaire .....                                                                                 | 2  |
| Dédicaces .....                                                                                | 3  |
| Remerciements .....                                                                            | 4  |
| Liste des figures .....                                                                        | 5  |
| Liste des tableaux .....                                                                       | 7  |
| INTRODUCTION GENERALE .....                                                                    | 8  |
| Chapitre 1 : Généralités sur les générateurs d'électrophorèse .....                            | 9  |
| Chapitre 2 : Conception du générateur d'électrophorèse .....                                   | 29 |
| Chapitre 3 : Réalisation, maintenance et étude économique du générateur d'électrophorèse ..... | 48 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE .....                                                                      | 61 |

## Dédicaces

*A mes parents **HOUNGBEME Alfred** et **AGONON Célestine***

*Je dédie ce mémoire*

***HOUNGBEME Dossou Christian***

## Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier Dieu Tout-Puissant, qui par sa grâce, m'a donné la santé, le courage et la force de réaliser ce mémoire de fin d'études. Ensuite, j'adresse mes plus profondes gratitude à l'endroit de :

- Directeur de l'EPAC, Professeur Guy ALLITONOU,
- Directeur Adjoint de l'EPAC, le Professeur Vincent PRODJINONTO ;
- Chef CAF, le Professeur Fidèle Paul TCHOBO,
- Professeur AGBOMAHENA Macaire, Professeur Titulaire des Universités du CAMES, Enseignant chercheur à l'EPAC/UAC, mon maître mémoire. Merci professeur.
- Docteur Audace DIDAVI pour son encadrement tout au long de ce travail.
- Monsieur Gérard HOUNNOUKPE, Directeur Technique Adjoint de la SBEE.

J'adresse aussi mes remerciements à tous les enseignants de l'EPAC en générale et ceux du Centre Autonome de Perfectionnement (CAP) en particulier pour leur dévouement dans la formation de la relève. Nous ne pouvons finir sans parler du personnel du CAP et des laboratoires, pour les aides et conseils durant cette formation.

Enfin, toutes mes reconnaissances à mon épouse, mes enfants, mes parents, ma famille pour leur prière, leur soutien moral et financier, sans oublier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

## Liste des figures

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1:</b> Schéma simplifié d'une cellule d'électrophorèse [1] .....                  | 9  |
| <b>Figure 2:</b> Exemple de circuit d'électrophorèse [1] .....                              | 10 |
| <b>Figure 3:</b> Générateur Power Pro 300 [4].....                                          | 13 |
| <b>Figure 4:</b> Générateur d'électrophorèse PS304XL [5] .....                              | 13 |
| <b>Figure 5:</b> générateur d'électrophorèse NANOPAC-300 [6] et JY-300C [7] .....           | 13 |
| <b>Figure 6:</b> Structure de l'agarose [8] .....                                           | 14 |
| <b>Figure 7:</b> Electrophorèse sur gel d'agarose [9] .....                                 | 14 |
| <b>Figure 8:</b> Structure du gel de polyacrylamide [10] .....                              | 15 |
| <b>Figure 9:</b> Schéma de base d'un système d'électrophorèse capillaire [9].....           | 16 |
| <b>Figure 10:</b> Exemple de résultat d'électrophorèse 2D [11] .....                        | 16 |
| <b>Figure 11:</b> Electrophorèse sur papier [12].....                                       | 17 |
| <b>Figure 12:</b> Exemple de générateur d'électrophorèse [13] .....                         | 19 |
| <b>Figure 13:</b> Schéma de principe d'une alimentation continue par redressement [14]..... | 21 |
| <b>Figure 14:</b> Redresseur à deux diodes [14].....                                        | 22 |
| <b>Figure 15:</b> Redresseur à quatre diodes [14].....                                      | 22 |
| <b>Figure 16:</b> Tension d'entrée et tension de sortie [14].....                           | 22 |
| <b>Figure 17:</b> Montage d'un condensateur pour le filtrage [14].....                      | 23 |
| <b>Figure 18:</b> Tension obtenue après filtrage [14].....                                  | 23 |
| <b>Figure 19:</b> Régulations par diode Zener [14].....                                     | 24 |
| <b>Figure 20:</b> Pont de Graëtz mixte [15].....                                            | 25 |

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 21:</b> Pont de Graëtz tout thyristor [15] .....                                     | 25 |
| <b>Figure 22:</b> Schéma synoptique du fonctionnement du générateur .....                      | 33 |
| <b>Figure 23:</b> Schéma du transformateur à sortie variable utilisé .....                     | 35 |
| <b>Figure 24:</b> Schéma détaillé du convertisseur d'alimentation de la carte Arduino Ino..... | 36 |
| <b>Figure 25:</b> Convertisseur AC/DC en 3D .....                                              | 36 |
| <b>Figure 26:</b> Schéma pour le redressement et le filtrage des tensions en sortie .....      | 37 |
| <b>Figure 27:</b> Module de relais 4 canaux.....                                               | 38 |
| <b>Figure 28:</b> Raccordement du Module de relais 4 canaux .....                              | 39 |
| <b>Figure 29:</b> Carte Arduino Uno .....                                                      | 40 |
| <b>Figure 30:</b> Exemple de Module RTC .....                                                  | 41 |
| <b>Figure 31:</b> Raccordement du RTC avec la carte Arduino .....                              | 42 |
| <b>Figure 32:</b> Ecran LCD 2X16 .....                                                         | 43 |
| <b>Figure 33:</b> Module I2C .....                                                             | 44 |
| <b>Figure 34:</b> Circuit de raccordement entre l'écran LCD et le Module I2C .....             | 44 |
| <b>Figure 35:</b> Schéma électrique général du générateur d'électrophorèse .....               | 46 |
| <b>Figure 36:</b> Vue 3D du générateur.....                                                    | 47 |
| <b>Figure 37:</b> Transformateur réalisé et bobine intérieure [23].....                        | 51 |
| <b>Figure 38:</b> Transformateur monophasé.....                                                | 51 |
| <b>Figure 39:</b> Photo du générateur .....                                                    | 52 |

## Liste des tableaux

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Tableau 1: Caractéristiques générales du générateur d'électrophorèse.....</i> | 30 |
| <i>Tableau 2: Coût des éléments conventionnels .....</i>                         | 54 |
| <i>Tableau 3: Coût de réalisation .....</i>                                      | 56 |
| <i>Tableau 4: Coût de la conception.....</i>                                     | 56 |
| <i>Tableau 5: Maintenance préventive.....</i>                                    | 58 |

## INTRODUCTION GENERALE

L'électrophorèse, une technique essentielle en biologie moléculaire, a révolutionné la façon dont les chercheurs analysent, séparent et caractérisent des macromolécules telles que l'ADN, l'ARN et les protéines. Cette méthode, qui repose sur la migration de particules chargées dans un gel sous l'influence d'un champ électrique, a permis des avancées significatives dans des domaines tels que la génomique, la protéinique, la recherche médicale et la criminalistique. Cependant, la mise en œuvre de l'électrophorèse nécessite souvent des équipements coûteux et complexes, ce qui limite l'accès à cette technique cruciale dans de nombreux laboratoires, en particulier dans les environnements à ressources limitées.

Dans ce contexte, le présent mémoire se propose d'explorer la conception et la réalisation d'un générateur d'électrophorèse, visant à simplifier et à démocratiser l'accès à cette technique analytique fondamentale. Cette démarche s'inscrit dans une optique d'innovation technologique, de recherche en ingénierie biomédicale, et de promotion de l'équité en matière d'accès aux outils de recherche scientifique.

Le but que vise ce projet est double. D'une part, il s'agit de développer un générateur d'électrophorèse capable de fournir des résultats fiables, reproductibles et précis, tout en étant abordable et facile à utiliser. D'autre part, il faut répondre à la question de savoir comment intégrer des avancées technologiques récentes pour améliorer la performance et l'efficacité de la technique, tout en minimisant les coûts et la complexité inhérente à son utilisation. Pour cela, il s'agira de :

- Concevoir un générateur d'électrophorèse innovant en combinant des concepts d'ingénierie électronique, mécanique et logicielle.
- Evaluer la performance de l'appareil en termes de résolution de séparation, de vitesse de migration, de sensibilité et de reproductibilité.
- Etudier l'aspect économique du générateur afin de garantir son accessibilité.

Les prochains chapitres présenteront d'une part la technologie de l'électrophorèse, les générateurs d'électrophorèse et d'autre part la conception, la réalisation et l'étude économique d'un générateur d'électrophorèse.



# Chapitre 1 : Généralités sur les générateurs d'électrophorèse

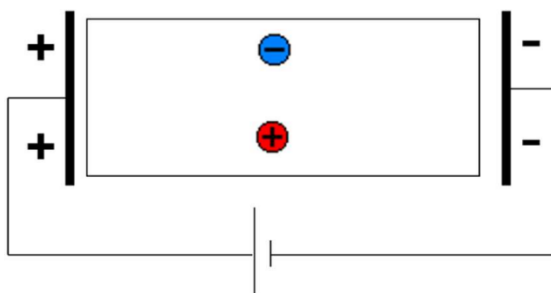
## 1.1. Introduction

L'électrophorèse, une technique fondamentale dans le domaine de la biologie et de la biochimie, permet la séparation de molécules en fonction de leur charge électrique et de leur mobilité dans un champ électrique. Au cœur de cette technique réside le générateur d'électrophorèse, un élément essentiel jouant un rôle crucial dans le processus. Ce premier chapitre vise à introduire les concepts généraux liés aux générateurs d'électrophorèse après de brèves généralités sur l'électrophorèse même.

## 1.2. Introduction à l'électrophorèse

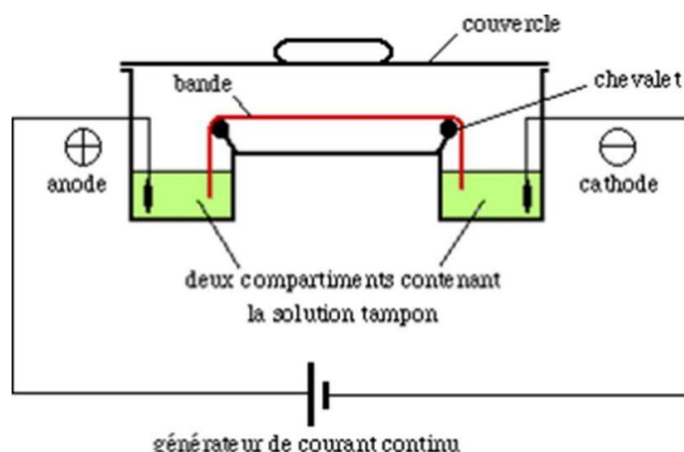
### 1.2.1. Définition de l'électrophorèse

L'électrophorèse est une technique de laboratoire largement utilisée pour séparer et analyser les molécules chargées électriquement, telles que les acides nucléiques (ADN, ARN) et les protéines. Elle repose sur le principe de la migration des molécules dans un support (gel ou solution capillaire) sous l'influence d'un champ électrique. Cette technique a révolutionné de nombreux domaines de la biologie moléculaire et de la chimie analytique en permettant la séparation et la caractérisation de diverses molécules biologiques en fonction de leur taille, de leur charge électrique et de leur conformation.



**Figure 1:** Schéma simplifié d'une cellule d'électrophorèse [1]

L'électrophorèse est le déplacement des particules chargées dans un milieu sous l'effet d'un champ électrique appliqué. La vitesse de migration dépend de la charge et de la taille des particules, ainsi que des propriétés du support dans lequel l'électrophorèse est réalisée. En fonction du type de molécule à analyser (ADN, ARN, protéines, etc.), différents types d'électrophorèse sont utilisés, tels que l'électrophorèse sur gel d'agarose, l'électrophorèse sur gel.



**Figure 2:** Exemple de circuit d'électrophorèse [1]

### 1.2.2. Principes fondamentaux de l'électrophorèse

L'électrophorèse est une technique de séparation des molécules chargées électriquement, basée sur leur mobilité dans un champ électrique. Les principes fondamentaux de l'électrophorèse reposent sur les propriétés des molécules et leur comportement sous l'influence d'un champ électrique. Ils sont détaillés ci-après.

La migration des molécules, elle dépend de leur charge électrique. Lorsque les molécules sont immergées dans un gel ou un milieu conducteur et soumises à un champ électrique, les charges électriques qu'elles portent les amènent à se déplacer vers l'électrode opposée, soit l'anode (+) ou la cathode (-). Les molécules chargées positivement migrent vers la cathode tandis que celles chargées négativement se dirigent vers l'anode. Ce mouvement est crucial pour la séparation des molécules.

La taille et la forme des molécules, elles influencent leur vitesse de migration. Les molécules plus petites se déplacent plus rapidement que les plus grandes, et celles de forme allongée migrent plus efficacement que les molécules rondes. Cette différence de mobilité permet de séparer les molécules en fonction de leur taille et de leur conformation, ce qui est particulièrement utile pour l'analyse de protéines, d'ADN, d'ARN et d'autres molécules biologiques.

Le support de séparation, il joue un rôle important dans l'électrophorèse. Les gels d'agarose ou d'acrylamide sont couramment utilisés pour séparer les molécules selon leur taille. Le gel agit comme un tamis moléculaire, permettant aux petites molécules de

migrer plus rapidement à travers ses pores, tandis que les plus grandes sont plus ralenties. Ainsi, les échantillons sont déposés sur un gel, puis le champ électrique est appliqué pour induire la séparation des molécules.

Le type d'électrophorèse, sa sélection dépend de l'objectif de l'expérience. Il existe plusieurs variantes de l'électrophorèse, notamment l'électrophorèse sur gel d'agarose, l'électrophorèse sur gel d'acrylamide (SDS-PAGE), l'électrophorèse bidimensionnelle (2D), l'électrophorèse capillaire, entre autres. Chaque méthode possède ses avantages spécifiques en termes de résolution et de gamme de séparation.

Enfin, l'électrophorèse est une technique polyvalente qui trouve des applications essentielles dans la recherche scientifique et le diagnostic médical. Elle est utilisée pour analyser la taille et la pureté des protéines, caractériser les acides nucléiques, détecter des mutations génétiques, identifier des marqueurs moléculaires et suivre la progression de certaines maladies. Grâce à sa sensibilité, sa facilité d'utilisation et son coût relativement bas, l'électrophorèse reste un outil incontournable pour les scientifiques et les cliniciens cherchant à comprendre la complexité des molécules biologiques et à résoudre des problèmes diagnostiques importants.

### **1.2.3. Historique de l'électrophorèse**

L'histoire de l'électrophorèse remonte au début du 19<sup>ème</sup> siècle, lorsque des scientifiques ont commencé à explorer les phénomènes électriques et les interactions avec la matière. La découverte de l'électrophorèse a été étroitement liée aux travaux sur l'électricité statique menés par des scientifiques tels que Charles-Augustin de Coulomb (France) et Thomas Young (Royaume-Uni). Ces chercheurs ont étudié les forces électriques entre les objets chargés, jetant ainsi les bases des phénomènes électriques qui allaient plus tard être utilisés en électrophorèse. Des scientifiques tels que Peter Ludvig Panum et Ferdinand Frederic Reuss observent les déplacements de particules chargées en suspension sous l'influence d'un champ électrique [2] [3].

Dans les années 1930, Tiselius développe l'électrophorèse en gel d'agarose, permettant la séparation des protéines [3]. Cette technique est ensuite affinée et popularisée dans les années 1950 [4]. L'introduction de l'électrophorèse en gel de polyacrylamide (PAGE)

dans les années 1970 par Weber et Osborn permet la séparation des protéines en fonction de leur poids moléculaire [5]. L'ajout du SDS pour neutraliser la charge des protéines a donné naissance à la technique SDS-PAGE. La technique de l'électrophorèse bidimensionnelle (2D-PAGE) est développée dans les années 1980 par O'Farrell, permettant une meilleure résolution des protéines en combinant les séparations basées sur la charge et la taille. L'électrophorèse capillaire, introduite dans les années 1990, permet des séparations rapides et efficaces de molécules, ouvrant de nouvelles perspectives dans l'analyse biomoléculaire [6]. Les avancées technologiques constantes ont conduit à une diversification des applications de l'électrophorèse dans la recherche en biologie, en biochimie et en biotechnologie.

Aujourd'hui, l'électrophorèse est largement utilisée dans la recherche scientifique, la biologie moléculaire, la génétique, la médecine et d'autres domaines connexes. Les progrès continus de la technologie ont permis de développer des méthodes plus sophistiquées et hautement sensibles, offrant ainsi des outils puissants pour l'analyse et la caractérisation des molécules biologiques.

### **1.3. Revue de la littérature**

#### **1.3.1. Quelques types de générateurs d'électrophorèse**

Aujourd'hui il existe une panoplie de fabricants de matériels médicaux tout comme les générateurs d'électrophorèse avec leur différente marque. On peut en dénombrer à date Cent huit (108) références des plus grandes marques à savoir : analytikjena OPTIMA (TOKIO) -Infitek - Benchmark – Olumex – Evident -seleo – WunSep -Bioptic Promega pour ne citer que ceux-là. Ils fabriquent des gammes de générateurs qui varient chacun en fonction de leur flexibilité des fonctionnalités qu'ils offrent. On en peut en citer :

**Le générateur électrique d'électrophorèse modèle Power Pro 300** qui est une œuvre de la société SOCIMED est un générateur multifonction polyvalent adapté à une large gamme d'application en électrophorèse.



**Figure 3:** Générateur Power Pro 300 [4]

Le générateur d'électrophorèse PS304XL est un œuvre du Laboratoire Humeau basé en France qui est type de générateur à coupure automatique en cas de fuites, de court-circuit, des circuits ouverts ou des surcharges. Il a comme caractéristiques principales Courant maxi : 400 mA Voltage Maxi : 300 V.



**Figure 4:** Générateur d'électrophorèse PS304XL [5]

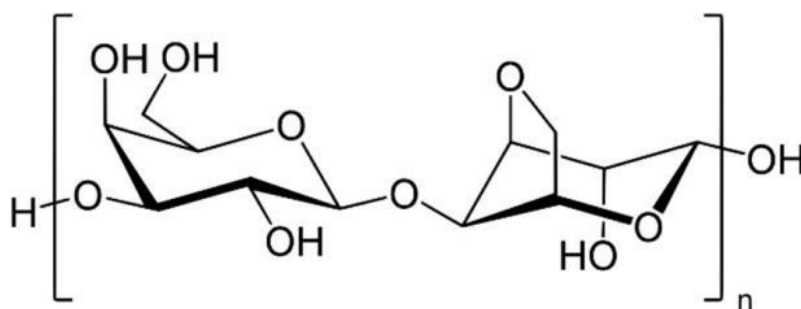
Le générateur d'électrophorèse NANOPAC-300 et JY-300C qui sont des œuvres de la société Polypharma Sarl. Il a pour caractéristique principales courant variable de 0 à 100 mA et tension variable de 0 à 300 VDCC.



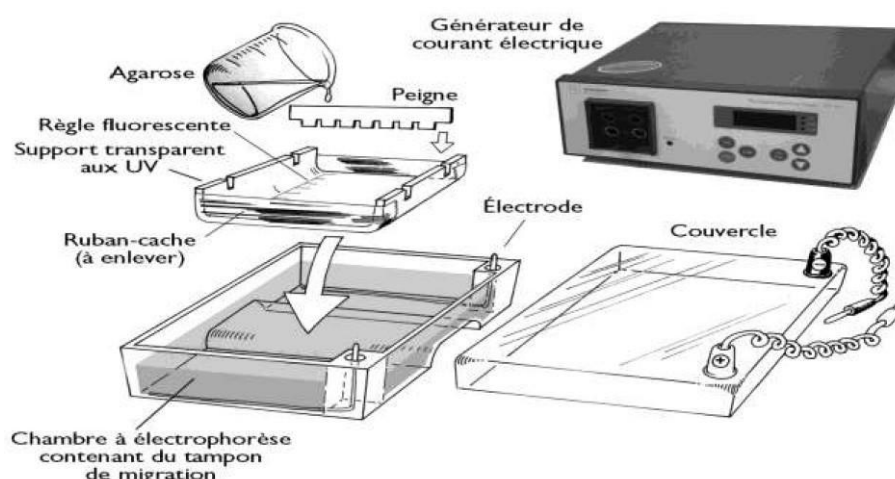
**Figure 5:** générateur d'électrophorèse NANOPAC-300 [6] et JY-300C [7]

### 1.3.2. Électrophorèse sur gel

L'électrophorèse sur gel est l'une des méthodes les plus courantes et polyvalentes utilisées en laboratoire. Elle implique la séparation des molécules dans un gel poreux, qui agit comme un tamis moléculaire. Les deux types d'électrophorèse sur gel les plus courants sont l'électrophorèse sur gel d'agarose et l'électrophorèse sur gel de polyacrylamide (PAGE). L'agarose est un polysaccharide extrait d'algues marines. Ce gel est utilisé principalement pour séparer de longues molécules d'ADN, telles que les fragments générés lors de la digestion enzymatique de l'ADN ou les produits de la réaction de PCR. Les pores du gel d'agarose sont de grande taille, ce qui permet aux molécules d'ADN de migrer à des vitesses différentes en fonction de leur taille. Les plus petites molécules migrent plus rapidement et se trouvent donc plus près de l'anode, tandis que les plus grandes restent plus près de la zone de chargement à la cathode.

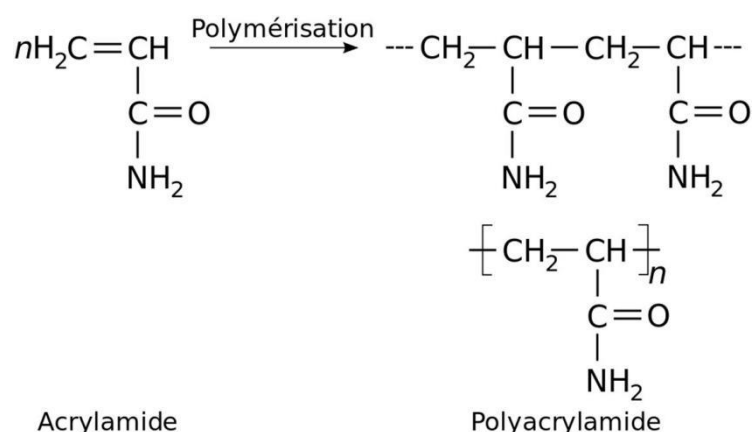


**Figure 6:** Structure de l'agarose [8]



**Figure 7:** Electrophorèse sur gel d'agarose [9]

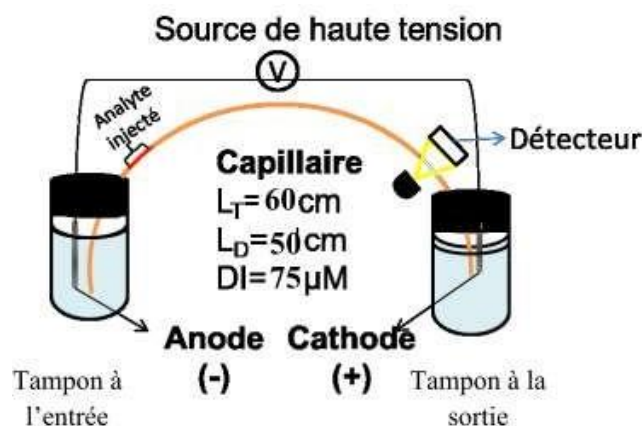
Le gel de polyacrylamide est utilisé pour séparer les protéines, les acides nucléiques à plus petite échelle et les oligonucléotides. Ce gel a des pores plus petits et offre une meilleure résolution que l'agarose, permettant ainsi de séparer des molécules de taille plus similaire. On distingue deux principaux types de PAGE : PAGE dénaturant et PAGE non dénaturant. Le PAGE dénaturant utilise du dodécyl sulfate de sodium (SDS) pour dénaturer les protéines et leur donner une charge négative uniforme, tandis que le PAGE non dénaturant est utilisé pour analyser la conformation native des protéines.



**Figure 8:** Structure du gel de polyacrylamide [10]

### 1.3.3. Électrophorèse capillaire

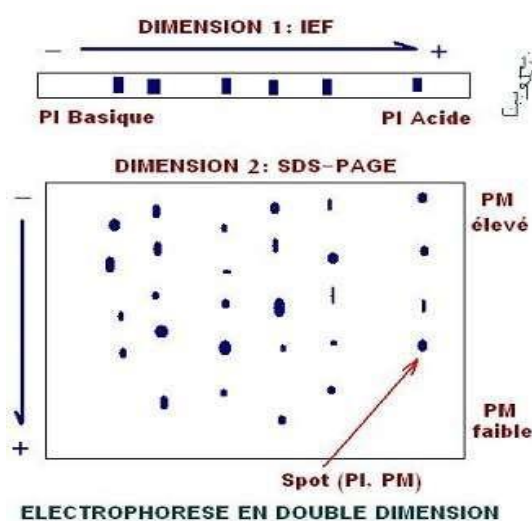
L'électrophorèse capillaire (EC) est une technique avancée qui utilise des capillaires fins en silice ou en polymère comme support de séparation. Les molécules sont séparées en fonction de leur charge, de leur taille et de leur conformation dans des capillaires remplis de tampon. L'EC offre des avantages par rapport aux méthodes sur gel, notamment une plus grande rapidité de séparation, une meilleure résolution et la possibilité d'automatiser le processus. Elle est largement utilisée en analyse des protéines, de l'ADN et de l'ARN, ainsi que dans des applications cliniques.



**Figure 9:** Schéma de base d'un système d'électrophorèse capillaire [9]

### 1.3.4. Électrophorèse bidimensionnelle (2D)

L'électrophorèse bidimensionnelle est une technique avancée qui combine deux séparations différentes pour améliorer la résolution. La première dimension utilise l'électrophorèse sur gel pour séparer les molécules en fonction de leur point isoélectrique (pI), qui est la valeur de pH à laquelle elles ont une charge nette égale à zéro. La seconde dimension utilise l'électrophorèse sur gel de polyacrylamide pour séparer les molécules en fonction de leur poids moléculaire. L'électrophorèse bidimensionnelle est souvent utilisée pour l'analyse des protéines, car elle permet une résolution plus élevée et une séparation plus complète des protéines complexes.

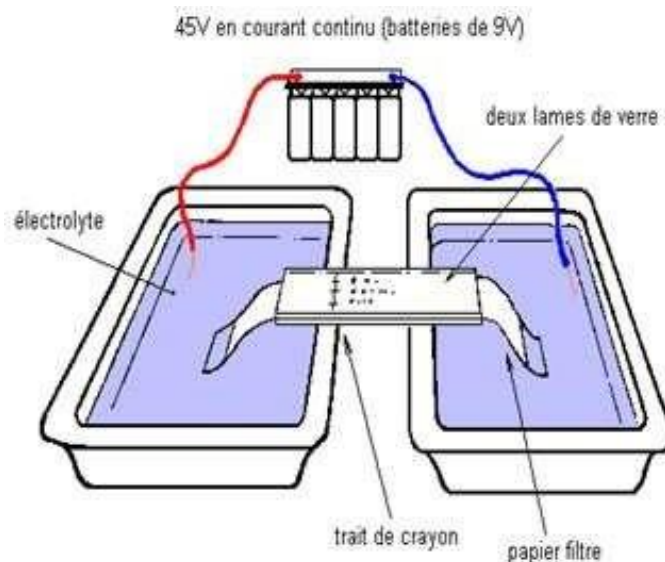


**Figure 10:** Exemple de résultat d'électrophorèse 2D [11]



### 1.3.5. Electrophorèse sur papier

L'électrophorèse sur papier, pionnière parmi les techniques électrophorétiques, a joué un rôle clé dans l'histoire de la biochimie et de la biologie moléculaire. Son développement a ouvert la voie à l'analyse des composants biologiques tels que les protéines et les acides aminés. Cette technique repose sur la migration des composants chargés à travers un papier absorbant sous l'influence d'un champ électrique, permettant ainsi la séparation en fonction de la charge, de la taille et de la forme des molécules. Bien qu'elle soit aujourd'hui moins couramment utilisée en raison des avancées technologiques, l'électrophorèse sur papier reste une technique importante dans le domaine médical.



*Figure 11: Electrophorèse sur papier [12]*

### 1.3.6. Autres types d'électrophorèse spécialisés (ex. électrophorèse en champ pulsé)

Outre les méthodes mentionnées ci-dessus, il existe d'autres techniques d'électrophorèse spécialisées utilisées pour des applications spécifiques. Par exemple, l'électrophorèse en champ pulsé (PFGE) est utilisée pour séparer de grands fragments d'ADN, comme des chromosomes entiers. La PFGE est souvent utilisée dans les études de génomique et dans la cartographie génétique. De plus, il existe des variantes d'électrophorèse adaptées à des applications spécifiques, telles que l'électrophorèse

capillaire à zone de cisaillement pour séparer les protéines membranaires.

## 1.4. Générateurs d'électrophorèse

### 1.4.1. Rôle des générateurs d'électrophorèse

Un générateur d'électrophorèse, également appelé source d'alimentation électrique, joue un rôle fondamental dans la technique de l'électrophorèse. Son rôle principal est de fournir une tension électrique contrôlée et stable pour créer le champ électrique nécessaire à la séparation des molécules chargées (comme les protéines, les acides nucléiques ou d'autres biomolécules) à travers un support de séparation, tel qu'un gel d'agarose ou de polyacrylamide, un papier, ou un capillaire. Les principaux rôles du générateur sont résumés ci-après :

- **Fournir une tension électrique constante** : Le générateur d'électrophorèse fournit une tension électrique constante entre les électrodes situées aux extrémités du support de séparation. Cette tension crée un champ électrique qui induit la migration des molécules. Chargées dans la direction souhaitée (de l'anode vers la cathode ou vice versa, selon la polarité).
- **Contrôler le courant électrique** : Certains générateurs d'électrophorèse sont équipés de mécanismes de contrôle du courant électrique. Le courant est souvent surveillé et maintenu constant pendant l'électrophorèse pour assurer des résultats reproductibles et éviter la surchauffe du gel.
- **Assurer la sécurité électrique** : Les générateurs d'électrophorèse sont conçus pour garantir la sécurité des opérateurs en évitant les courts-circuits ou les décharges électriques. Ils sont dotés de dispositifs de protection, tels que des disjoncteurs, pour couper automatiquement l'alimentation en cas de problème.
- **Permettre la programmation des paramètres électriques** : Certains générateurs d'électrophorèse offrent la possibilité de programmer des paramètres spécifiques tels que la tension, le courant, le temps d'exécution, et même des rampes de tension pour des applications avancées.

En résumé, le générateur d'électrophorèse est essentiel pour la réalisation de séparations

électrophorétiques contrôlées et reproductibles en fournissant la tension électrique adéquate, en contrôlant le courant électrique, en assurant la sécurité des opérateurs et en permettant la visualisation des résultats. Il constitue ainsi un composant clé des techniques d'électrophorèse utilisées en biologie moléculaire, en biochimie et dans d'autres domaines de la recherche scientifique.

### 1.4.2. Caractéristiques des générateurs d'électrophorèse

Selon la technique de l'électrophorèse, l'utilisation finale, la marque et d'autres paramètres, les caractéristiques des générateurs d'électrophorèse diffèrent. Les caractéristiques principales communes sont :

- |                                                  |                              |
|--------------------------------------------------|------------------------------|
| ❖ Minuterie                                      | (humidité relative)          |
| ❖ Courant maximal (mA)                           | ❖ Tension maximale (V)       |
| ❖ Tension d'entrée (tension, courant et période) | ❖ Puissance maximale (W)     |
| ❖ Température de fonctionnement                  | ❖ Type de contrôleur         |
| ❖ Environnement d'exploitation                   | ❖ Nombre de paires de sortie |



**Figure 12:** Exemple de générateur d'électrophorèse [13]

A ces caractéristiques, l'on peut avoir le poids, les dimensions, le matériau de fabrication, la résolution d'affichage, le type d'affichage, les marques de conformité (CE ou ETL) ...

### **1.4.3. Différents types de générateurs électrophorétiques**

Il existe principalement deux types de générateurs électrophorétiques couramment utilisés en électrophorèse, qui sont les générateurs de tension constante et les générateurs de courant constant.

Dans les générateurs de tension constante, une tension électrique constante est appliquée aux électrodes pour créer un champ électrique stable à travers le gel ou le milieu de l'électrophorèse. Les caractéristiques importantes des générateurs de tension constante incluent la stabilité de la tension, la facilité de contrôle de la vitesse de migration des molécules, et leur utilisation courante dans des techniques telles que l'électrophorèse en gel d'agarose et l'électrophorèse en gel de polyacrylamide.

Quant au générateur de courant constant, au lieu de maintenir une tension constante, les générateurs de courant constant maintiennent un courant électrique constant tout au long de l'électrophorèse. Cela signifie que la tension peut varier en fonction de la résistance du milieu, mais le courant reste constant. Les générateurs de courant constant sont souvent utilisés dans l'électrophorèse capillaire, où le gel ou le support peut varier en résistance. Ils sont également utiles pour la séparation de molécules ayant des charges variables.

Chacun de ces types de générateurs électrophorétiques a ses propres avantages et applications spécifiques, en fonction des besoins de la séparation électrophorétique. Le choix du générateur dépendra de facteurs tels que la taille des molécules à séparer, la résistance du support et d'autres paramètres expérimentaux.

## **1.5. Fonctionnement des générateurs d'électrophorèse**

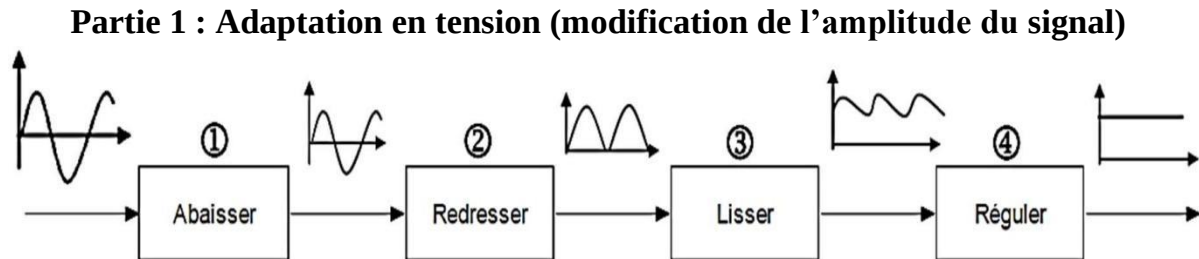
### **1.5.1. Généralité sur l'alimentation en courant continu**

Comme vu dans la section précédente, un générateur électrophorèse doit fournir un courant ou une tension continue et stable. Ce système est appelé ''alimentation continue stabilisée'. Elles font l'objet de plusieurs travaux en électronique, mais le principe fondamental reste le même. Il existe trois principaux types d'alimentation : l'alimentation par redresseur, l'alimentation par redressement commandé et

l'alimentation par convertisseur continu-continu.

### 1.5.2. Alimentation par redresseur

Elle est composée de quatre parties comme l'indique la figure ci-dessous.

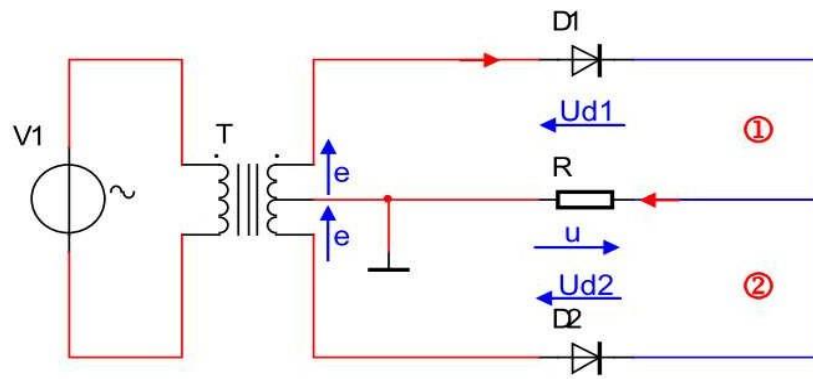


**Figure 13:** Schéma de principe d'une alimentation continue par redressement [14]

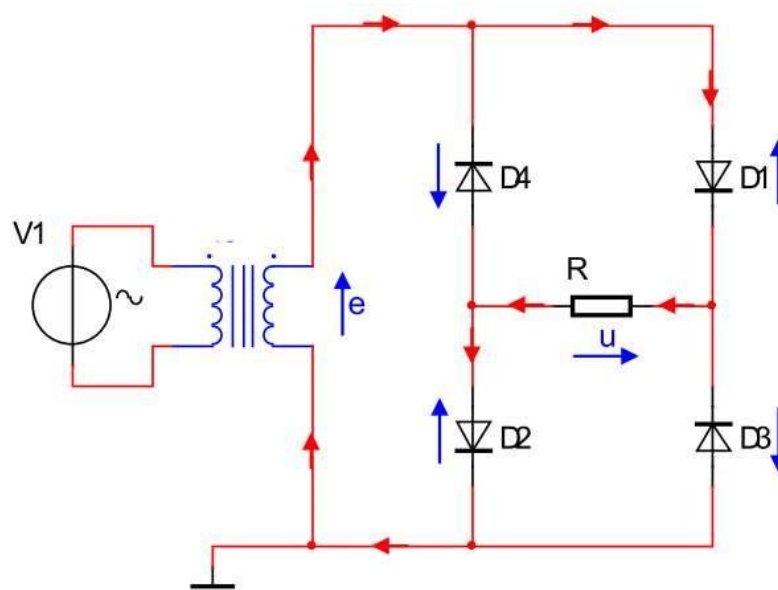
Elle est réalisée par l'intermédiaire d'un transformateur à partir de la tension fournie par le réseau. Le choix du transformateur dépend de la puissance (puissance apparente) à fournir par l'alimentation et de la tension du réseau. La tension au secondaire du transformateur qui est égale à la tension redressée que l'on désire avoir en sortie de l'alimentation.

#### Partie 2 : Redressement

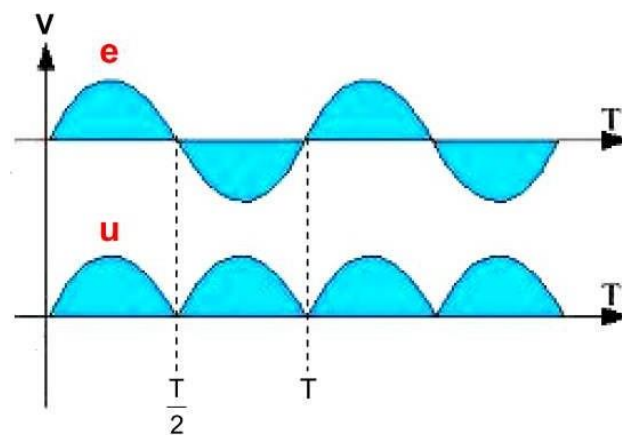
Il est réalisé par l'intermédiaire d'une ou plusieurs diodes de redressement. La tension de seuil de la diode est négligée lors de l'étude des différents types de redressement. Il existe deux possibilités de redressement, un montage avec deux diodes ou un montage avec quatre diodes. La figure 13 présente la tension alternative à l'entrée  $e$  et la tension continue à la sortie  $u$ .



**Figure 14:** Redresseur à deux diodes [14]



**Figure 15:** Redresseur à quatre diodes [14]

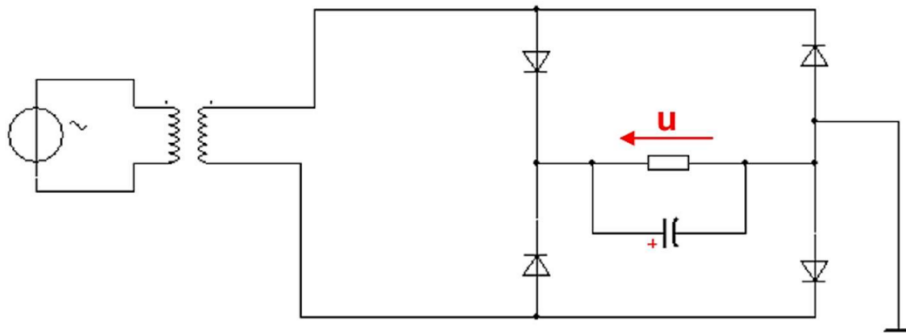


**Figure 16:** Tension d'entrée et tension de sortie [14]

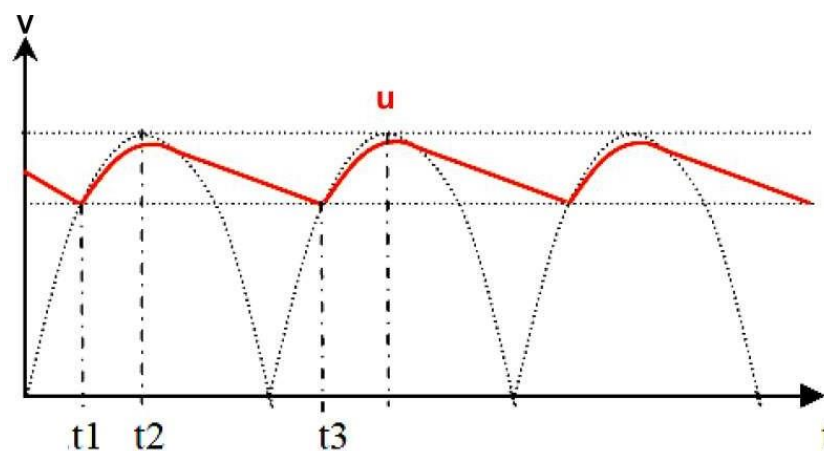
### Partie 3 : Filtrage (ou lissage)

Le filtrage dans une alimentation en tension continue vise à réduire les variations indésirables du courant continu produit. Des condensateurs, principalement des électrolytiques, sont utilisés pour lisser les fluctuations de tension en agissant comme des réservoirs d'énergie. Dans certains cas, des inductances (bobines de filtrage) peuvent être intégrées pour éliminer les bruits à haute fréquence. Le filtrage est crucial pour assurer une sortie de courant stable, particulièrement important dans des applications sensibles où des variations de tension pourraient entraîner des dysfonctionnements ou des dommages aux dispositifs électroniques. La figure 14 montre un exemple de montage de condensateur de filtrage.

La figure 17 présente également la tension obtenue après filtrage. De  $t_1$  à  $t_2$ , l'énergie fournie à la charge passe par les diodes. Celle-ci chargera également le condensateur. De  $t_2$  à  $t_3$ , le condensateur se décharge et fournira l'énergie à la charge.



**Figure 17:** Montage d'un condensateur pour le filtrage [14]



**Figure 18:** Tension obtenue après filtrage [14]

#### Partie 4 : Stabilisation (ou régulation)

Pour éviter la surtension aux bornes de la charge, on doit prévoir des dispositifs pour régler la tension. On peut citer deux principaux types de régulation rencontrés dans la pratique : les régulations par transistor et/ou diode Zener et les régulations par circuits intégrés.

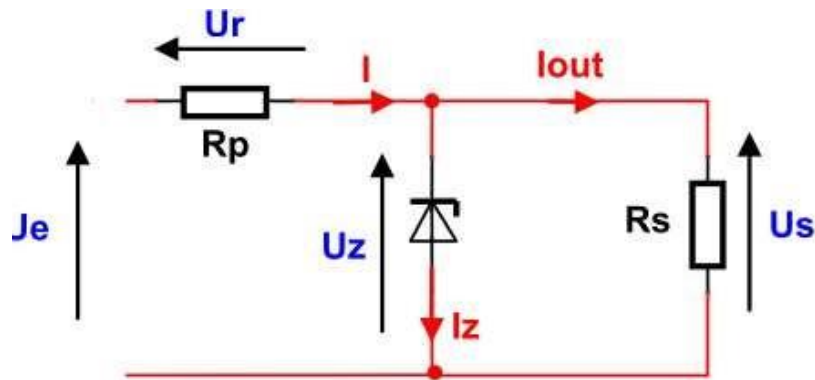


Figure 19: Régulations par diode Zener [14]

#### 1.5.3. Alimentation par redressement commandé

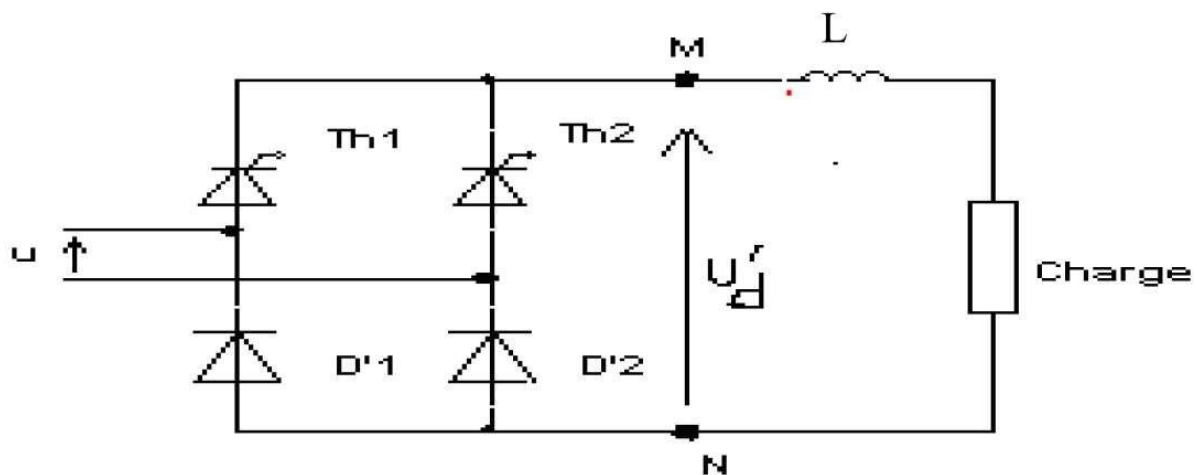
Une alimentation à partir d'un redresseur commandé implique l'utilisation d'un dispositif électronique appelé redresseur commandé, également connu sous le nom de thyristor ou de dispositif à semi-conducteurs, pour convertir l'électricité alternative en courant continu de manière contrôlée. Contrairement à un redresseur classique, le redresseur commandé permet de réguler le flux de courant en fonction de signaux de commande.

Le redresseur commandé est généralement constitué de thyristors, des dispositifs semi-conducteurs bidirectionnels (diode par exemple) qui permettent le passage du courant dans un seul sens lorsqu'ils sont déclenchés par un signal de commande. Cela offre un contrôle précis sur le moment où le courant est redressé, permettant ainsi de réguler la tension de sortie. Ce contrôle peut être réalisé par des dispositifs électroniques de commande qui ajustent le déclenchement des thyristors en fonction des besoins du système. Cette approche présente des avantages en termes de régulation fine de la tension

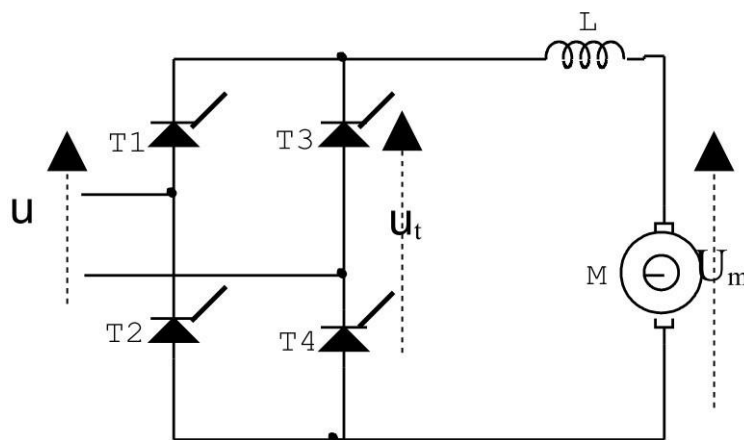


de sortie et offre une plus grande efficacité dans la conversion de l'énergie électrique. Les alimentations à partir de redresseurs commandés sont utilisées dans diverses applications, notamment dans les systèmes d'alimentation industriels, les variateurs de vitesse pour moteurs électriques, et d'autres applications où une régulation précise de la tension de sortie est cruciale.

On distingue deux montages, le pont de Graëtz mixte (Diodes et thyristors) et le pont de Graëtz tout thyristors (parallèle, parallèle double, série). Pour le pont de Graëtz mixte, on utilise deux diodes et deux Thyristors comme composants de puissance en commutation. Le montage est schématisé à la figure 20. Quant au pont de Graëtz tout thyristors, il est composé de quatre thyristors. Il pourrait se faire à partir du montage de la figure 21.



**Figure 20:** Pont de Graëtz mixte [15]



**Figure 21:** Pont de Graëtz tout thyristor [15]

#### **1.5.4. Alimentation par convertisseur continu-continu**

L'alimentation par un convertisseur continu-continu, également appelé hacheur, est un processus dans lequel un dispositif électronique appelé hacheur est utilisé pour réguler la tension continue. Le hacheur est un type de convertisseur DC-DC qui fonctionne en modulant la durée d'ouverture d'un interrupteur électronique, généralement un transistor, pour ajuster la tension de sortie.

Le hacheur peut être de différents types, tels que le hacheur abaisseur (buck), le hacheur élévateur (boost), ou le hacheur abaisseur-élévateur (buck-boost), en fonction des besoins spécifiques du système. Dans un hacheur abaisseur, la tension de sortie est inférieure à la tension d'entrée, tandis que dans un hacheur élévateur, la tension de sortie est supérieure. Le hacheur abaisseur-élévateur peut produire une tension de sortie inférieure ou supérieure à la tension d'entrée. Le fonctionnement du hacheur implique la commutation rapide de l'interrupteur, ce qui crée un signal de tension pulsée. Un filtre peut être utilisé pour lisser ce signal, produisant ainsi une tension de sortie continue. Cette technique de modulation de largeur d'impulsion (PWM) permet d'ajuster la tension de sortie de manière efficace.

Les différents types de hacheur fréquemment rencontrés sont le hacheur série, le hacheur parallèle, le hacheur à accumulation inductive, le hacheur à accumulation capacitive, le hacheur réversibles en courant et en tension (quatre quadrants). Le hacheur à accumulation que ce soit inductif ou capacitif est spécialement destiné pour les alimentations à découpage.

Les hacheurs sont largement utilisés dans divers domaines tels que l'électronique de puissance, les alimentations à découpage, les systèmes de gestion de l'énergie, et d'autres applications où une conversion d'énergie efficace et un contrôle précis de la tension sont nécessaires. Ils ne sont pas adaptés aux générateurs d'électrophorèses car ils ne peuvent pas fonctionner avec la tension alternative sous-secteur.

#### **1.5.5. Systèmes de sécurité électrique**

Pour prévenir tout risque électrique ou dommage aux échantillons, un générateur

d'électrophorèse est doté de dispositifs de sécurité électrique. Des fusibles, des disjoncteurs et des circuits de protection contre les surintensités sont souvent intégrés pour éviter tout court-circuit ou toute surcharge électrique. Des capteurs de courant peuvent également être utilisés pour surveiller en temps réel le courant électrique dans le système. En cas de détection d'anomalies, le générateur peut interrompre automatiquement l'alimentation électrique pour éviter tout incident.

### 1.5.6. Interfaces utilisateur et logiciels de contrôle

L'interface de contrôle dans un générateur d'électrophorèse est une plateforme conviviale qui permet aux utilisateurs de surveiller et de régler les paramètres de leur électrophorèse de manière efficace. Cette interface joue un rôle essentiel dans l'optimisation des conditions expérimentales et la garantie de la reproductibilité des résultats. Voici comment elle fonctionne, en mettant également en évidence l'importance des logiciels associés :

- **Paramétrage des Conditions :** L'interface de contrôle permet aux utilisateurs de définir les conditions de leur électrophorèse, y compris la durée de l'expérience, la tension électrique appliquée, la température, et d'autres paramètres spécifiques à leur protocole.
- **Surveillance en Temps Réel :** Grâce à des capteurs intégrés dans le générateur, l'interface fournit une surveillance en temps réel des conditions expérimentales. Les utilisateurs peuvent visualiser les courbes de température, de tension électrique, et d'autres paramètres critiques pendant le déroulement de l'électrophorèse.
- **Ajustements Dynamiques :** En cas de variations ou d'anomalies détectées, l'interface permet des ajustements dynamiques. Par exemple, si la température augmente au-delà des limites définies, le système peut ajuster automatiquement les paramètres pour maintenir des conditions optimales.
- **Automatisation des Protocoles :** Les interfaces modernes sont souvent dotées de fonctionnalités d'automatisation. Les utilisateurs peuvent préprogrammer des protocoles d'électrophorèse complexes, ce qui simplifie le processus et réduit les erreurs humaines.
- **Logiciels Associés :** Les logiciels dédiés sont souvent fournis avec ces interfaces pour une utilisation plus avancée. Ces logiciels permettent le suivi à distance, la collecte de

données sur une période prolongée, l'analyse des résultats, et parfois même la génération de rapports automatisés. Ils facilitent également la gestion et le stockage des données expérimentales.

En intégrant ces fonctionnalités dans l'interface de contrôle, les générateurs d'électrophorèse offrent une expérience utilisateur plus intuitive et rationalisée. Les logiciels associés permettent une analyse approfondie des résultats, favorisant ainsi une meilleure compréhension des données générées au cours des expériences d'électrophorèse. Cette approche globale contribue à l'efficacité des protocoles d'électrophorèse et à la qualité des résultats obtenus.

## **1.6. Conclusion partielle**

Cette brève généralité sur l'électrophorèse a permis de faire une synthèse sur les techniques d'électrophorèse et de mieux comprendre les principes de son déroulement. Les différents types de générateurs d'électrophorèse et leur fonctionnement ont été revus également. Tous ces éléments permettent de mieux choisir les caractéristiques et par conséquent les différents composants du générateur, objet de cette étude. Les chapitres suivants sont consacrés à la conception et au montage d'un générateur d'électrophorèse.

## **Chapitre 2 : Conception du générateur d'électrophorèse**

### **2.1. Introduction**

La conception d'un générateur d'électrophorèse revêt une importance capitale dans le domaine de la biologie moléculaire. Ce chapitre se propose d'explorer en détail les étapes et les considérations essentielles pour la mise en place d'un générateur d'électrophorèse, en mettant l'accent sur les éléments clés qui influencent sa performance de la technique. Les principes de conception, les composants clés, les contraintes techniques, et les choix stratégiques qui guident la création de cet instrument seront abordés également.

En plongeant au cœur du processus de conception, nous visons à fournir une base solide pour la compréhension et la réalisation de générateurs d'électrophorèse, ouvrant ainsi la voie à des avancées significatives dans le domaine de la biologie et de la recherche biomédicale.

### **2.2. Cahier de charge**

La présente proposition de cahier des charges émane de la nécessité pressante de développer un générateur d'électrophorèse de pointe, capable de répondre aux exigences des laboratoires d'analyse biomédicale et au niveau économique des pays en voie de développement. En tant qu'outil fondamental d'analyse, le générateur d'électrophorèse doit être conçu avec une approche holistique, intégrant quelques avancées technologiques tout en garantissant une convivialité d'utilisation et une fiabilité maximale. Il doit respecter des caractéristiques techniques, économique, environnement et sécuritaire. Le tableau ci-dessous indique les caractéristiques majeures à respecter par le générateur. Le générateur doit respecter au minimum ces différents éléments.

**Tableau 1:** Caractéristiques générales du générateur d'électrophorèse

| Caractéristiques                                       | Valeurs / Marges / Objectifs                                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Précision et Fiabilité                                 | Assurer des conditions électrophorétiques stables, garantissant la reproductibilité des résultats.                                                                                     |
| Rapidité et Efficacité                                 | Donner le choix de la vitesse d'électrophorèse aux Utilisateur                                                                                                                         |
| Polyvalence                                            | Pouvoir accueillir différents types de gels et s'adapter à diverses applications, de la séparation d'ADN à celle des protéines. Le fonctionnement doit être indépendant du type de gel |
| Facilité d'Utilisation                                 | Interface utilisateur intuitive, commandes simples                                                                                                                                     |
| Protection                                             | Protection contre les surtensions, protection contre l'infiltration d'eau                                                                                                              |
| Maintenabilité                                         | Maintenance aisée, Accès simple                                                                                                                                                        |
| Type de gel                                            | Multiple                                                                                                                                                                               |
| Mutinerie                                              | 1-1440 min                                                                                                                                                                             |
| Tension d'entrée<br>(tension, courant<br>et période)   | 220 - 230V, 1-5A, 50-60Hz                                                                                                                                                              |
| Tension de sortie                                      | 150 –220 - 350 V                                                                                                                                                                       |
| Température de<br>fonctionnement                       | 16-40 °C                                                                                                                                                                               |
| Environnement<br>d'exploitation<br>(humidité relative) | $\leq 95\%$                                                                                                                                                                            |
| Puissance maximale<br>(W)                              |                                                                                                                                                                                        |
| Nombre de paires de<br>sortie                          | 2                                                                                                                                                                                      |
| Dimension                                              | Maximum : 50x50x30                                                                                                                                                                     |
| Matériaux de<br>protection                             | Disponibilité locale et imperméable à l'eau                                                                                                                                            |

## **2.3. Présentation et fonctionnement du générateur**

### **2.3.1. Présentation du générateur**

Le générateur de cette étude est un générateur de tension fournissant différents niveaux de tensions continue soit : 150V, 220V et 350V ; à partir d'une source de tension alternative (220V dans notre cas d'étude). Dans ce dispositif, le choix des niveaux de tensions se fait par appui sur un bouton et d'autres fonctionnalités comme l'affichage de l'heure à temps réel, le choix de la durée de traitement et bien d'autres. Bon nombre d'éléments comme les modules électroniques et composants électriques sont utilisés pour la réalisation de ce dispositif et aux nombres de ces éléments, nous pouvons énumérer : la carte Arduino Uno, l'écran LCD ; le module I2C, le Module relais 4 canaux ; le module RTC (Real Time Clock) ; le convertisseur AC /DC ; le Transformateur Monophasé (1E - 5S), les Boutons poussoirs, le Fusible, les LED et les condensateurs.

### **2.3.2. Fonctionnement du générateur**

Le dispositif étant constitué des éléments cités ci-dessus, et étant mis sous-tension (220V dans notre cas) alors les opérations ci-après peuvent être exécutées. Un appui sur le bouton marche, fait allumer la LED verte qui signale le début des différentes tâches. Après calibrage de la tension souhaitée, l'appui sur le bouton SET sert à valider le choix et le dispositif ayant reçu l'information sur le niveau de tension, réagit à son tour pour qu'on ait exactement la tension sélectionnée à la sortie pour une utilisation donnée. Après la validation du choix de la tension, une des LED rouge s'allume pour informer du choix effectué (Led D1 pour la tension de 150V, Led D2 pour la tension de 220V et Led D3 pour la tension de 350V).

Pour le choix des tensions (150V ou 220V ou 350V dans notre cas) ; un transformateur monophasé élévateur à une tension de 350 V mais à une entrée (1E) et cinq sorties (5S), de même que des modules relais de 5V sont utilisés pour cette tâche. Chaque phase souhaitée à la sortie du transformateur est reliée chacune à l'entrée de chaque module relais : Dans ce cas, la phase de 350V est reliée au relais RL1, celle de 220V au relais RL2 et puis celle de 150V au relais RL3. La commande de ces relais est

donnée par une carte Arduino Uno. Ainsi après un choix et validation de la tension souhaitée, le relais correspondant s'actionne et à la suite d'un circuit de redressement et de filtrage, la tension souhaitée en continue est obtenue.

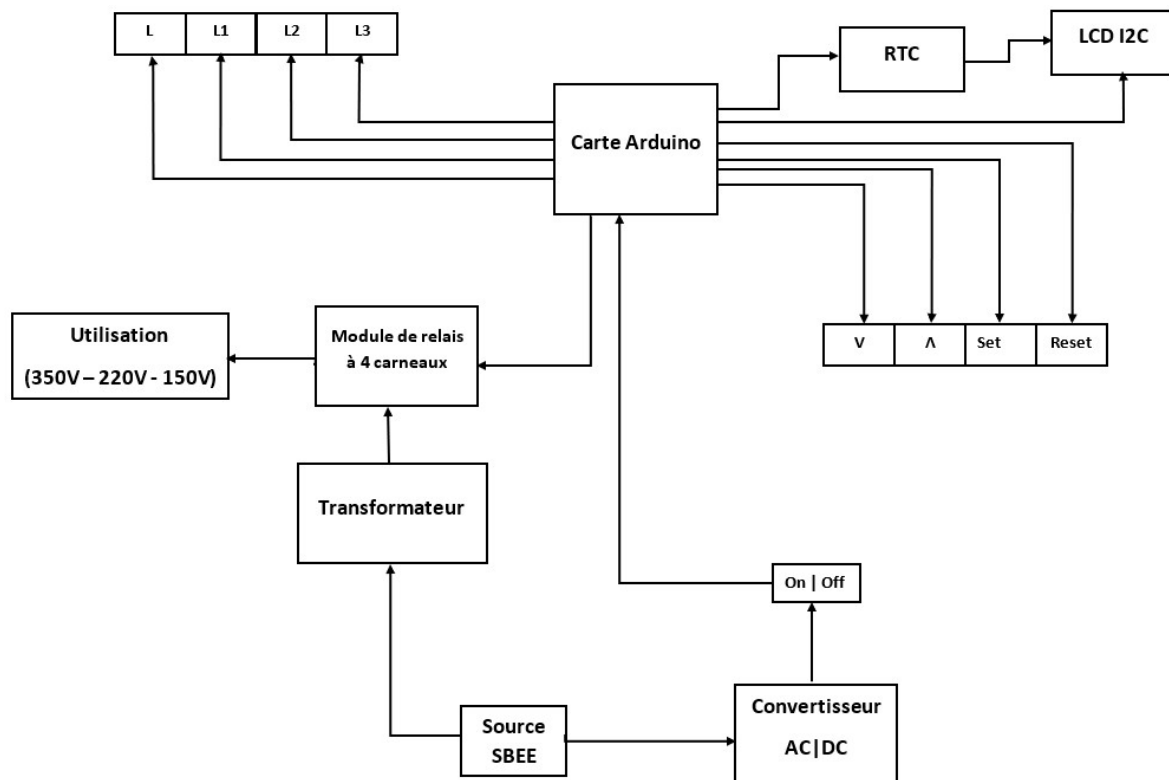
Quant aux différentes fonctionnalités ajoutées au dispositif comme l'affichage de l'heure à temps réel par exemple, un module RTC a été utilisé pour un décompte très précis du temps et un écran LCD muni d'un module I2C pour l'affichage de l'heure actuelle. De même, pour le fonctionnement du générateur à une tension donnée dans un délai spécifié au préalable, différents boutons sont utilisés pour cette opération :

- ❖ le bouton INCREMENTER pour incrémenter à volonté le temps de travail du générateur ;
- ❖ le bouton DECREMENTER pour décrémenter à volonté le temps de travail du générateur ;
- ❖ le bouton SET pour valider la durée incrémentée ou décrémentée ;
- ❖ le bouton RESET pour mettre à zéro le compteur du temps, ou reprendre le fonctionnement du dispositif selon le programme.

La définition de la durée du travail est observable sur l'écran LCD.

La carte Arduino utilisée est munie d'un microcontrôleur ATMEGA328PU pour l'exécution du programme et le contrôle des différentes tâches ou opérations. Son alimentation est en 5V DC et est faite à partir d'un autre circuit de redressement, de filtrage et de régulation. La figure ci-dessous présente un schéma synoptique du générateur.





*Figure 22: Schéma synoptique du fonctionnement du générateur*

## 2.1. Caractéristiques des éléments principaux

### 2.1.1. Détermination des paramètres du transformateur pour sa réalisation

Un transformateur est un dispositif électrique utilisé pour modifier la tension d'un courant alternatif sans changer la fréquence. Il est composé de deux enroulements de fil (généralement appelés bobines) enroulés autour d'un noyau magnétique. Les parties d'enroulements sont désignées comme le "primaire" et le "secondaire". Le courant électrique est appliqué au primaire, ce qui crée un champ magnétique dans le noyau. Ce champ magnétique induit ensuite une tension dans le secondaire.

Les transformateurs sont largement utilisés dans les réseaux électriques pour augmenter ou réduire la tension de l'électricité afin de la rendre adaptée à diverses applications. Les transformateurs sont utilisés pour augmenter la tension (élévation) lors de la transmission de l'électricité sur de longues distances pour minimiser les pertes d'énergie, puis réduire la tension (abaissement) pour une utilisation résidentielle et commerciale. Ils sont également utilisés dans de nombreux appareils électroniques pour

adapter la tension d'alimentation à leurs besoins spécifiques ; c'est le cas de ce générateur d'électrophorèse. Ainsi le transformateur utilisé dans le cadre de ce travail de recherche a été minutieusement étudié, conçu et réalisé, témoignant d'un processus méticuleux d'ingénierie électrique.

Pour assurer une utilisation adéquate, le générateur doit permettre de choisir la tension de sortie entre 150V et 350V. Un générateur à sortie variable a été utilisé à cette fin. Un transformateur à sortie variable est un type spécifique de transformateur qui permet de régler la tension de sortie selon les besoins. Ce réglage peut se faire de manière manuelle ou automatique, offrant ainsi une flexibilité dans l'adaptation de la tension électrique fournie. Ces transformateurs sont souvent utilisés dans des applications où la tension d'alimentation doit être ajustée en fonction des exigences spécifiques du système. Par exemple, dans certains laboratoires, industries ou systèmes expérimentaux, il peut être nécessaire de modifier la tension d'alimentation pour tester différents composants électroniques ou s'adapter à des conditions variables.

La figure 23 schématise le transformateur à sortie variable utilisée. Il permet d'avoir des sorties de 35 V, 150V, 220V et 350V. L'utilisateur a donc ces différents choix. On désigne par :

- $U_1$  : la tension au primaire
- $I_1$  : le courant au primaire
- $U_{21}$ ,  $U_{22}$  et  $U_{23}$  : les tensions au secondaire
- $I_2$  : le courant au secondaire.

La puissance apparente est donnée par l'expression  $S_1 = U_1 \times I_1$ .

Pour la réalisation nous avons besoin des choix des sections de fils pour les bobinages du primaire et celui du secondaire. Alors en restant en concordance avec les règles de sécurité électrique suivant l'exploitation à laquelle serait soumise le produit nous avons fixé le courant admissible  $I_2$ .

$$S_2 = U_2 \times I_2$$

Tenant compte des essais en charge nous avons approximativement un rendement

$$\eta = 0,75 \quad \eta = S_2 / S_1 \quad S_1 = S_2 / \eta \quad S_1 = U_1 \times I_1 \rightarrow I_1 = S_1 / U_1$$

$S_1$  la section du bobinage primaire et  $S_2$  la section du bobinage secondaire.

Restant dans le respect des règles des sécurités sans pour autant créer trop de chute de tension nous avons fixé la densité du courant  $J = 2 \text{ A/mm}^2$

$$J_1 = I_1/s_1 \rightarrow s_1 = I_1/J_1$$

$$J_2 = I_2/s_2 \rightarrow s_2 = I_2/J_2$$

Calcul du nombre de tours pour chaque enroulement

- **Pour le primaire :**

$$N_1 = U_1/U_2 \times N_2$$

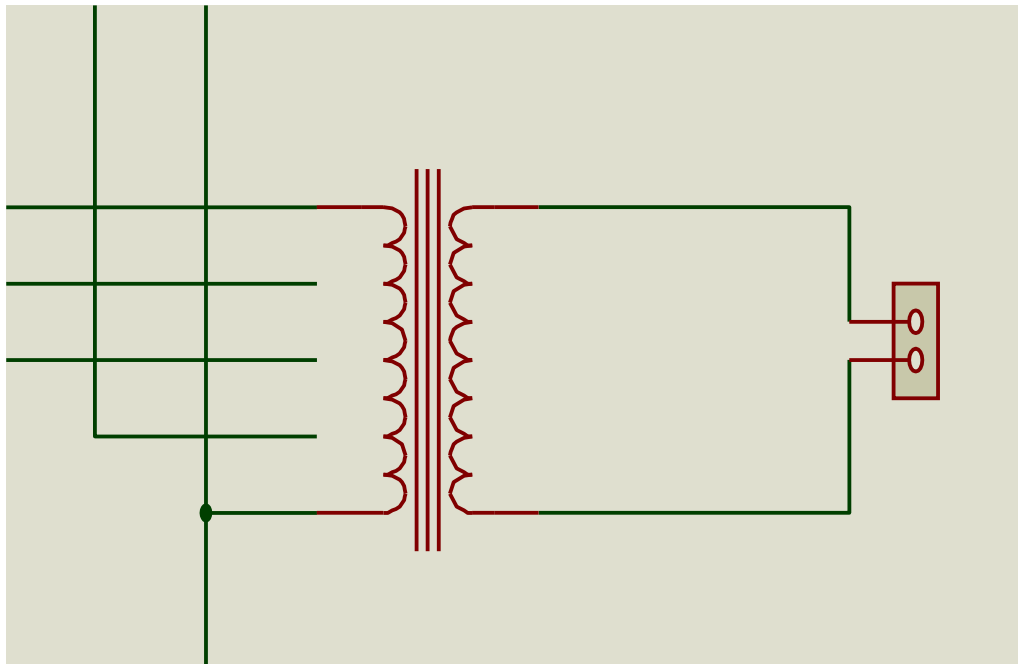
- **Pour le secondaire :**

$$N_2 = U_2/U_1 \times N_1$$

$$N_{23} = U_{23} / (U_1 \times N_1)$$

$$N_{22} = U_{22} / (U_1 \times N_1) = N_1$$

$$N_{21} = U_{21} / (U_1 \times N_1)$$

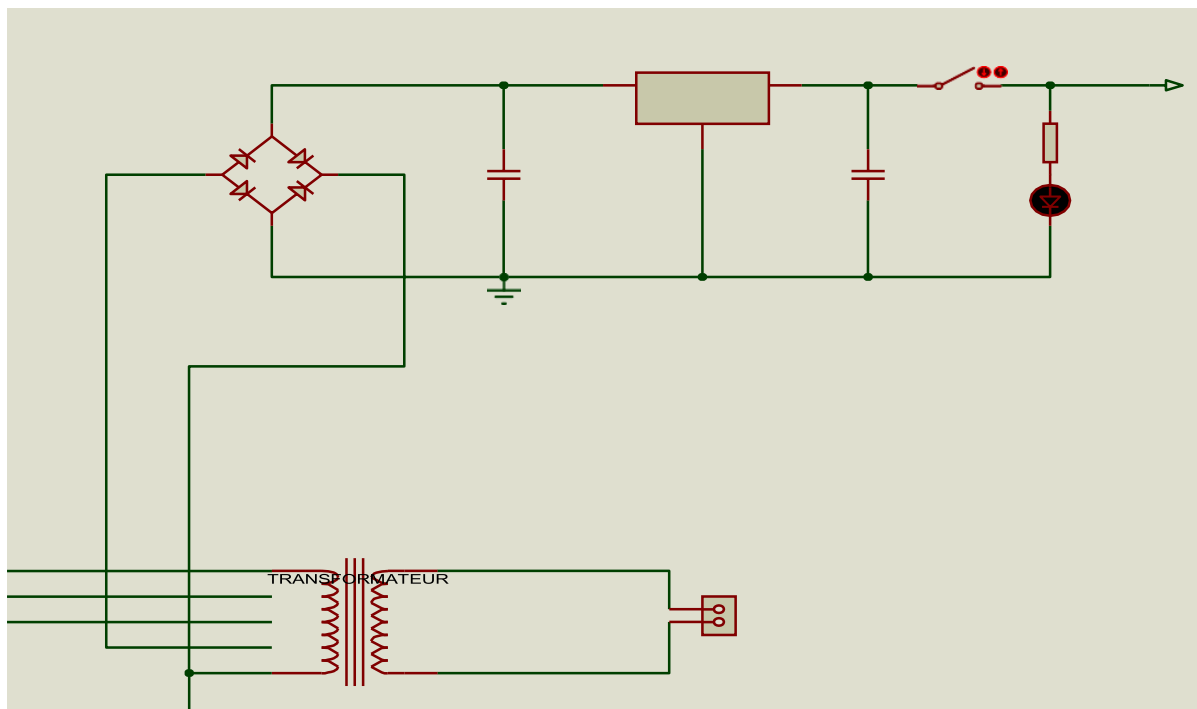


**Figure 23:** Schéma du transformateur à sortie variable utilisé

### 2.1.2. Le convertisseur AC/DC

Le convertisseur AC/DC utilisé permet de transformer une tension alternative en une autre continue et fixe. Dans notre cas il est utilisé pour alimenter en 5V la carte Arduino Uno. Un convertisseur AC/DC, également connu sous le nom d'alimentation électrique ou d'edredresseur, est un dispositif électronique utilisé pour convertir le courant alternatif (AC) en courant continu (DC). La figure 24 illustre le schéma électrique du convertisseur

AC/DC utilisé pour l'alimentation de la carte Arduino Uno. La figure 25 montre le convertisseur en 3D



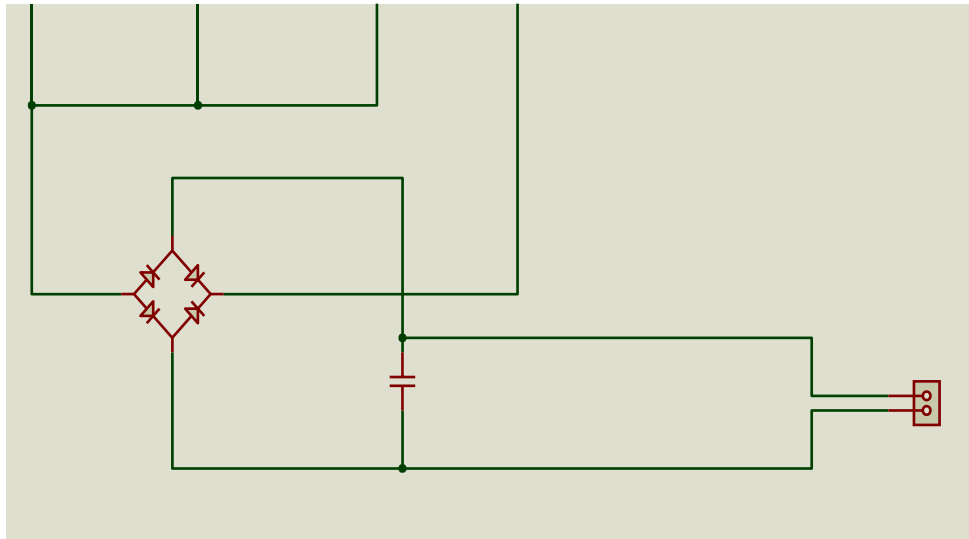
**Figure 24:** Schéma détaillé du convertisseur d'alimentation de la carte Arduino



**Figure 25:** Convertisseur AC/DC en 3D

### 2.1.3. Alimentation continue de sortie

Afin d'obtenir une tension continue à la sortie du générateur, un circuit de redressement a été utilisé. Il s'agit du redressement expliqué à la section 1.5.2. Il permet de transformer la tension de sortie du transformateur en une tension continue stable. Il est composé d'un circuit de redressement et de filtrage.



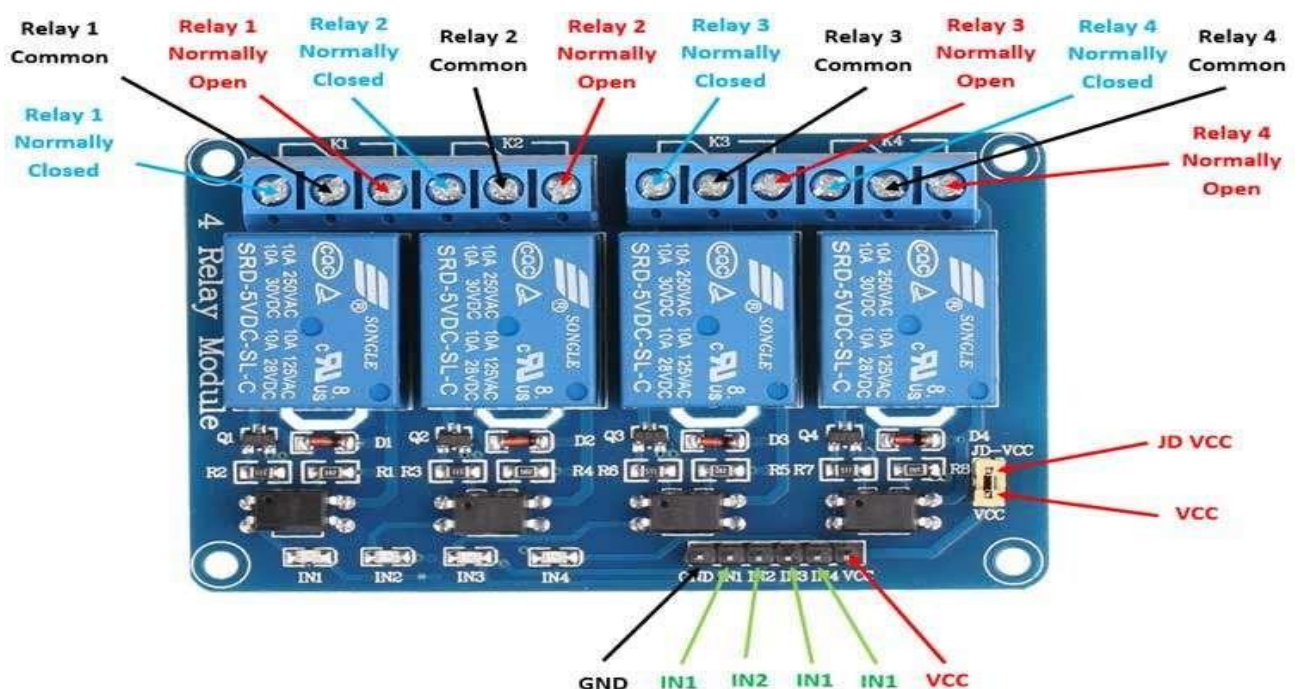
**Figure 26:** Schéma pour le redressement et le filtrage des tensions en sortie

### 2.1.4. Le module de relais de sélection

Un module relais de sélection ou Module relais à canaux est un dispositif électronique qui permet de commuter, activer ou désactiver jusqu'à quatre circuits électriques indépendants à l'aide de signaux de commande externes. Chaque canal du module relais contrôle un circuit séparé, ce qui le rend utile dans divers projets électroniques et domotiques. Généralement, le module comporte quatre canaux, ce qui signifie qu'il peut contrôler jusqu'à quatre dispositifs ou circuits électriques distincts. La tension de fonctionnement du module relais peut varier, mais elle est en général avec des tensions courantes comme 5V ou 12V, en fonction des besoins du projet. Chaque canal peut avoir une spécification de courant maximal qu'il peut commuter en toute sécurité. Certains modules utilisent des relais mécaniques, tandis que d'autres peuvent utiliser des relais à semi-conducteurs (solid-state relays) qui ont l'avantage d'être silencieux et plus

durables. Certains modules peuvent être commandés directement par des microcontrôleurs comme Arduino, Raspberry Pi, etc., via des signaux logiques, comme le cas de cette étude.

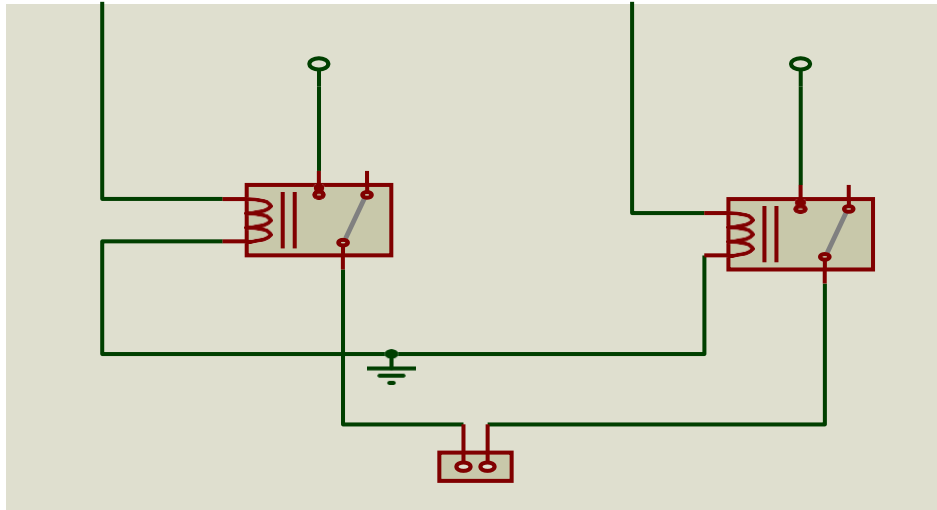
Lors de l'utilisation d'un module relais 4 canaux, il est important de respecter les spécifications électriques pour éviter tout dommage aux équipements et assurer un fonctionnement sûr. En outre, il est recommandé de se familiariser avec les principes de base de l'électronique et de la commutation de relais pour une utilisation efficace. Le module de sélection utilisé dans ce travail est un module 4 canaux, alimenté par une source de 5V provenant de la commande du microcontrôleur. Les relais sont activés par excitation de leur bobine et le circuit entre les bornes commune (C) et normalement ouvert (NO) se ferment permettant ainsi d'avoir la tension désirée à la sortie.



**Figure 27:** Module de relais 4 canaux

En considérant les caractéristiques de chaque relais, on remarque que pour chaque relais, la tension maximale qu'ils peuvent supporter est de 250V avec un courant maximal de 10A. Face à cela, la connexion de la phase 350V au relais RL1 n'est donc pas possible

et pour y remédier, il faut additionner les tensions 220V et 150V. Ceci donnera une tension avoisinante 370V AC qui sera diminué un peu afin d'envisager l'obtention de la tension continue 350V à la sortie. Le schéma ci-dessous montre comment faire le raccordement :



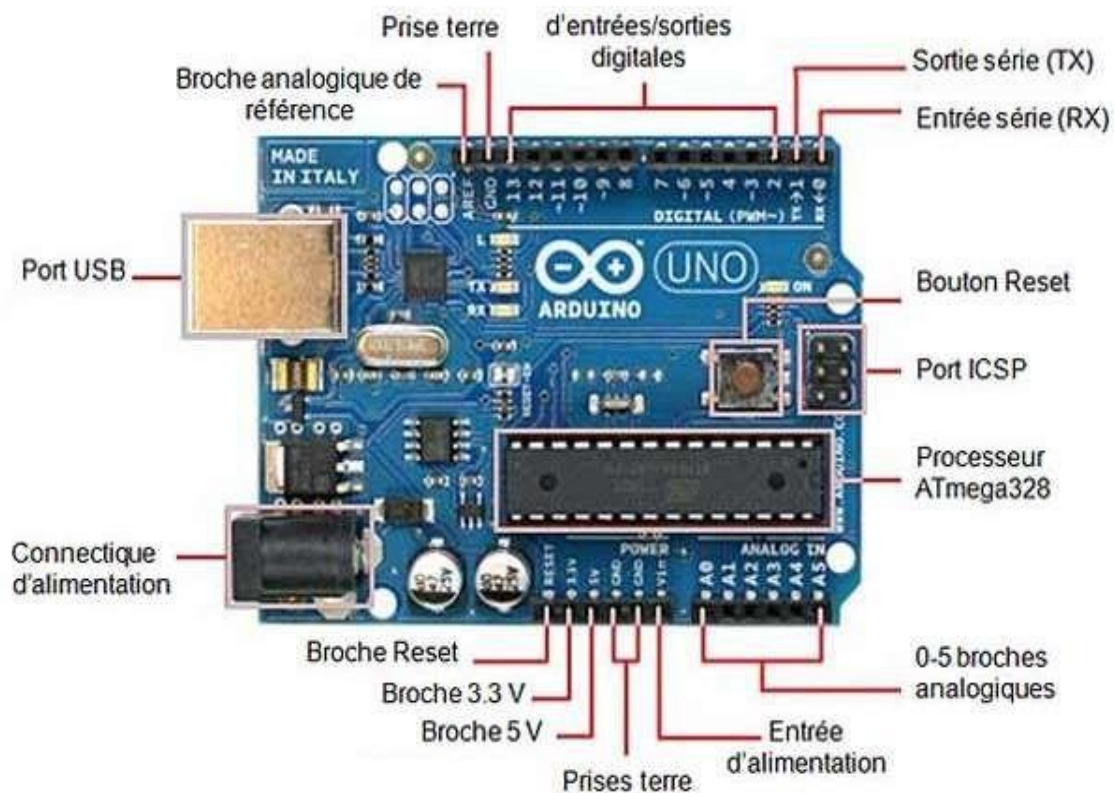
**Figure 28:** Raccordement du Module de relais 4 canaux

### 2.1.5. Le système de contrôle / Carte Arduino

Le système de contrôle d'un système électrique, généralement appelé système de commande, est une composante essentielle qui permet de superviser, réguler et automatiser les opérations d'un système électrique. Il peut être utilisé dans divers contextes, tels que les systèmes d'alimentation électrique, les systèmes de contrôle industriels, les systèmes domotiques, etc. Pour ce générateur, il a été utilisé une carte Arduino.

La carte Arduino le moteur du système et elle est constituée d'un microcontrôleur ATMEGA328PU pour le contrôle et l'exécution des tâches avec une vitesse de 16MHz. La carte Arduino est une plateforme open-source de prototypage électronique qui offre une interface conviviale pour le développement de projets interactifs. Il utilise un environnement de développement intégré (IDE) basé sur le langage de programmation C/C++, facilitant la création de code pour surveiller et contrôler des composants électriques. Ses broches d'entrée/sortie polyvalentes et sa flexibilité en font un choix

populaire pour une variété d'applications, allant des projets éducatifs aux prototypes avancés. La communauté active d'utilisateurs contribue à une vaste bibliothèque de ressources, faisant de l'Arduino un outil accessible et puissant pour l'expérimentation électronique.



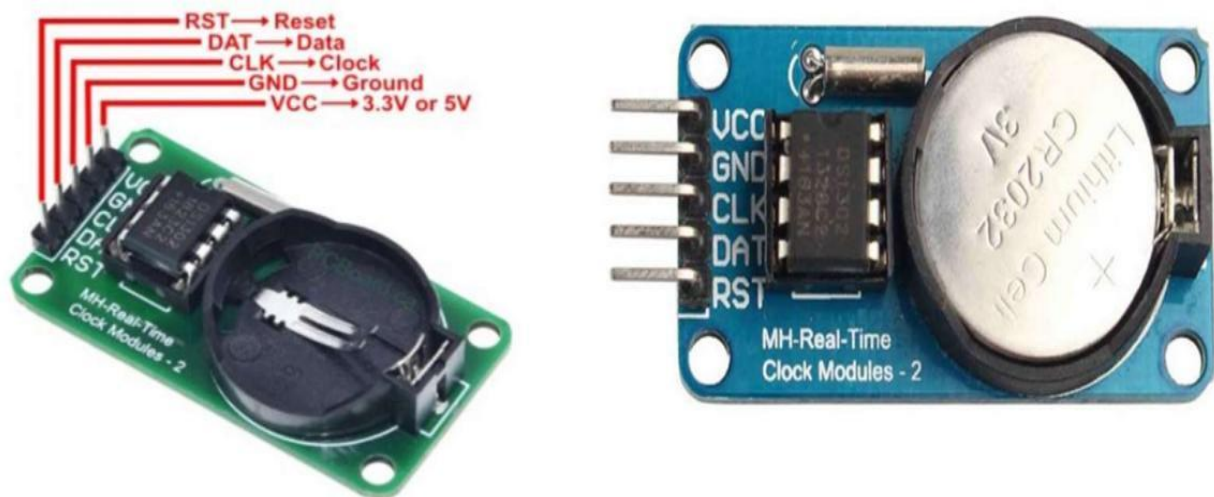
*Figure 29: Carte Arduino Uno*

### 2.1.6. Module RTC

Le module RTC DS1302, doté de fonctionnalités avancées, est un composant électronique très prisé pour ses capacités de suivi précis du temps. Intégrant une horloge temps réel ainsi qu'une mémoire RAM limitée, ce module fonctionne généralement avec une faible consommation d'énergie, rendant son utilisation idéale dans une variété de projets électroniques. Grâce à sa compatibilité avec des microcontrôleurs populaires tels qu'Arduino et Raspberry Pi, le DS1302 trouve sa place dans des applications diverses telles que la conception d'horloges électroniques sophistiquées, des systèmes d'automatisation intelligents, des enregistreurs de données temporisés, et d'autres projets

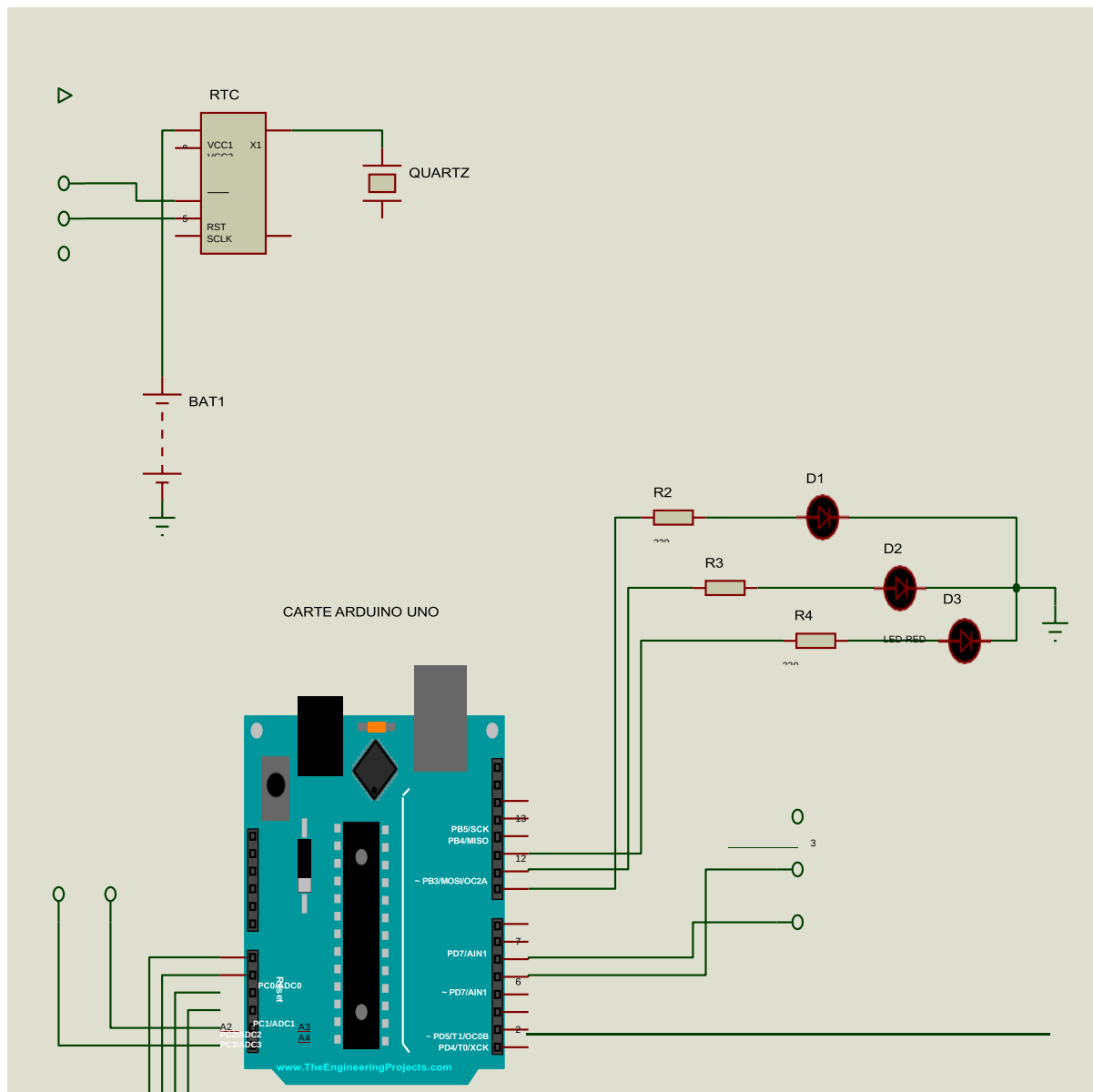


DIY où une gestion précise du temps est essentielle. Son alimentation polyvalente et sa communication série simplifiée en font un choix attractif pour les amateurs et les développeurs électroniques cherchant à incorporer une composante fiable pour la mesure et la synchronisation temporelle. Il a été utilisé dans ce générateur pour la gestion du temps, le stockage du temps de l'essai (en cas de coupure). La gestion de ce module est faite par la carte Arduino Ino.



**Figure 30:** Exemple de Module RTC

2  
1



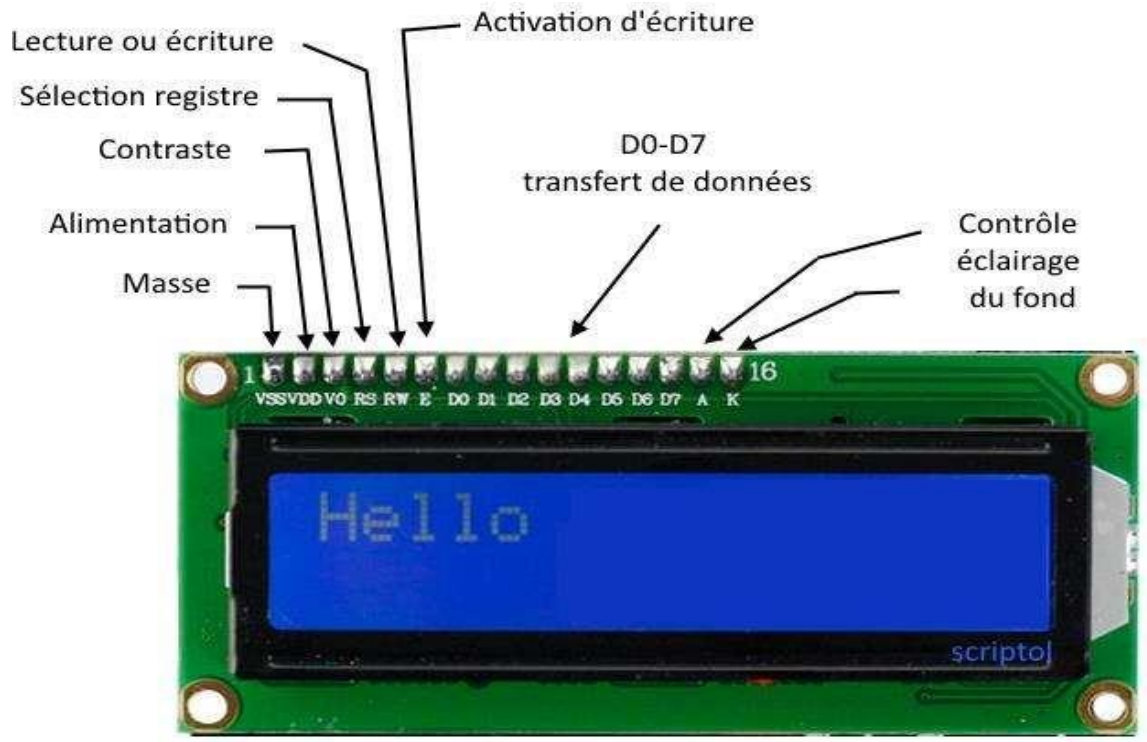
**Figure 31:** Raccordement du RTC avec la carte Arduino

### 2.1.7. L'écran LCD et Module I2C

L'écran LCD (Liquid Crystal Display) et le module I2C (Inter-Integrated Circuit) sont deux composants souvent utilisés conjointement dans des projets électroniques, particulièrement dans le domaine de l'informatique embarquée et de l'électronique DIY (Do It Yourself).

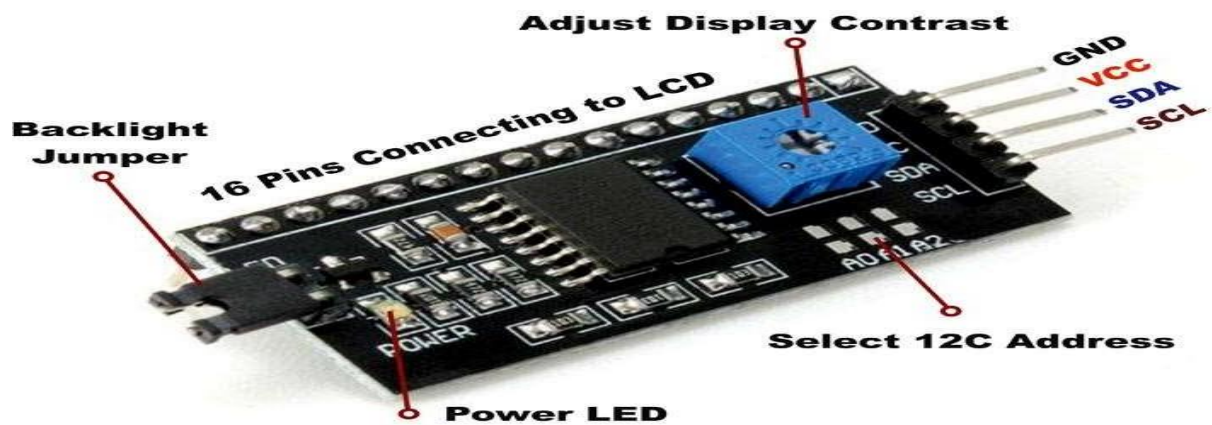
Un écran LCD est un dispositif d'affichage qui utilise des cristaux liquides pour produire des images ou du texte. Ils sont couramment utilisés pour afficher des informations dans des projets électroniques tels que des montres, des thermostats, des stations météo,

etc. Les cristaux liquides réagissent aux variations de tension pour permettre ou bloquer la lumière, ce qui crée des segments ou des pixels qui forment des caractères ou des images. Les écrans LCD sont présents dans de nombreux appareils électroniques grand public.



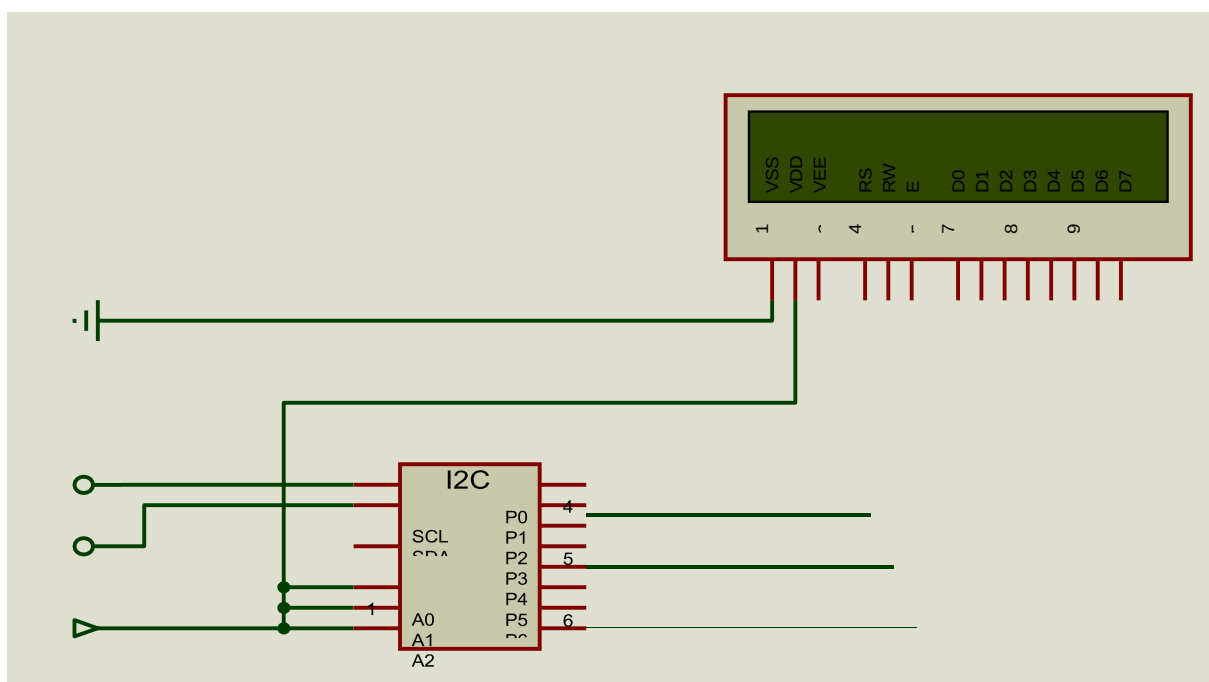
**Figure 32:** Ecran LCD 2X16

Le Module I2C (Inter-Integrated Circuit) est un protocole de communication série permettant la transmission de données entre plusieurs composants électroniques sur le même circuit. Un module I2C est un dispositif qui facilite l'interface entre un microcontrôleur et d'autres périphériques via le bus I2C. Le bus I2C utilise deux fils, un pour la transmission de données (SDA - Serial Data) et un pour la synchronisation (SCL - Serial Clock). Les périphériques connectés au bus I2C ont des adresses uniques pour permettre une communication sélective. Les modules I2C sont couramment utilisés pour simplifier la connexion de plusieurs périphériques à un microcontrôleur, ce qui réduit le nombre de broches nécessaires pour les connexions.



**Figure 33:** *Module I2C*

L'utilisation d'un module I2C avec un écran LCD simplifie le câblage et économise des broches sur le microcontrôleur, car la communication avec l'écran LCD est gérée par le module I2C. L'écran LCD est connecté au module I2C, qui est ensuite relié au microcontrôleur. Cela permet une communication efficace entre le microcontrôleur et l'écran. L'utilisation d'un écran LCD avec un module I2C est une approche courante dans le développement de projets électroniques, simplifiant le câblage et améliorant l'efficacité de la communication avec le microcontrôleur. Cela est particulièrement utile dans des environnements où les ressources de broches sont limitées.

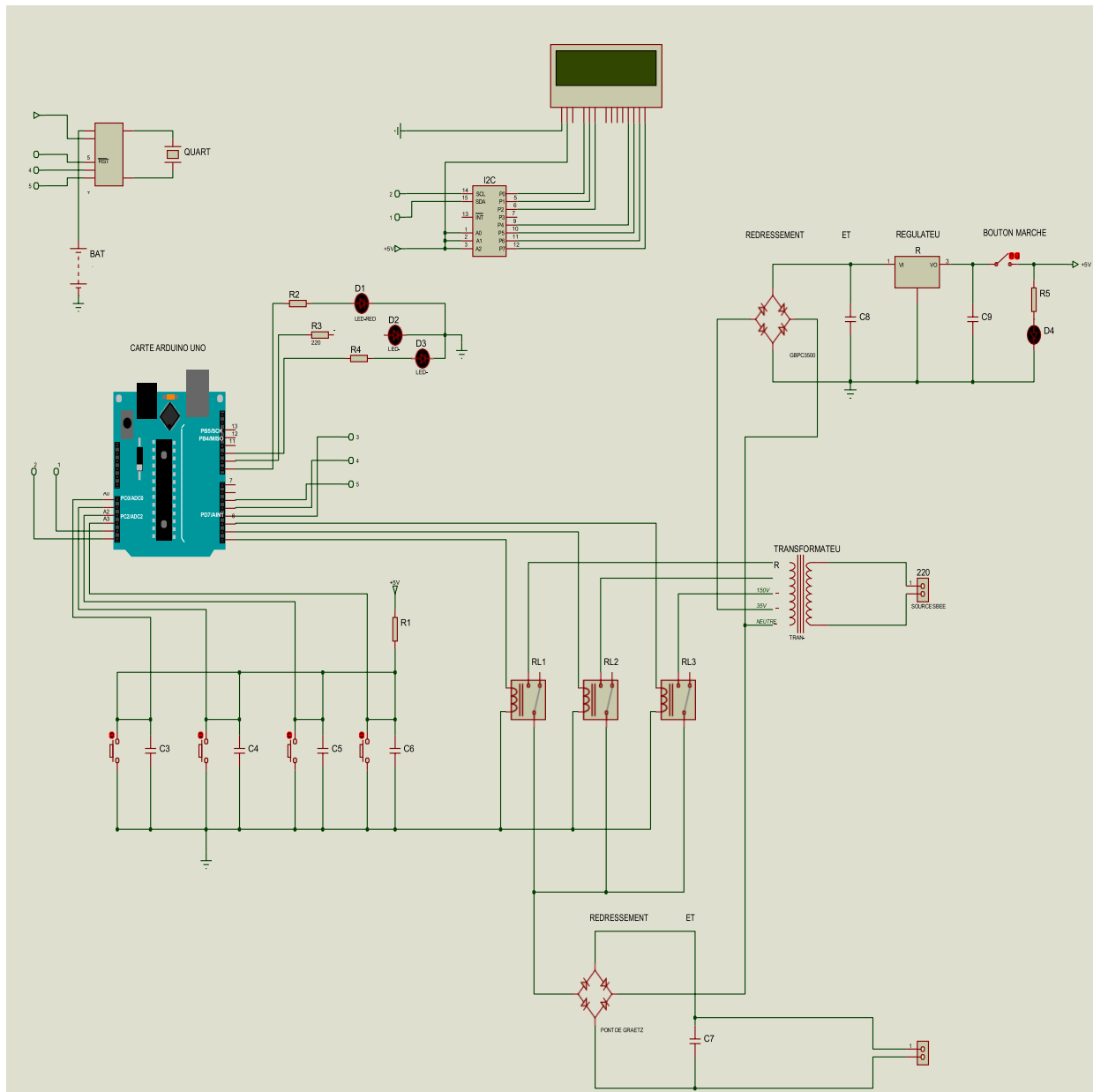


**Figure 34:** *Circuit de raccordement entre l'écran LCD et le Module I2C*

## **2.2. Elaboration des circuits du générateur**

### **2.2.1. Schéma électrique générale**

La modélisation 2D d'un équipement représente une avancée significative dans la conception et l'analyse des systèmes électrique et électroniques. En utilisant des outils de modélisation graphique, cette approche offre une représentation visuelle détaillée du générateur, permettant aux ingénieurs et concepteurs de visualiser précisément les composants, les flux d'énergie et les interactions au sein du système. Cette modélisation 2D offre une perspective holistique, facilitant la détection précoce de potentielles inefficacités, la simulation de scénarios divers, et l'optimisation des performances du générateur. Grâce à cette représentation graphique détaillée, les professionnels peuvent prendre des décisions éclairées, accélérer le processus de conception, et garantir l'efficacité opérationnelle optimale du générateur à toutes les étapes de son cycle de vie. La figure ci-dessous montre la modélisation de l'ensemble des circuits et des composants du générateur.



**Figure 35:** Schéma électrique général du générateur d'électrophorèse

### 2.2.2. Vue 3D de la carte électronique

Après avoir établi une base solide avec la modélisation 2D de l'appareil, l'intégration de la modélisation 3D constitue une avancée significative qui ouvre de nouvelles perspectives dans la conception. La modélisation 3D offre une représentation tridimensionnelle immersive de l'appareil, permettant une exploration approfondie de sa structure, de sa forme et de ses fonctionnalités. En capturant les détails avec une précision spatiale, cette approche permet aux ingénieurs de visualiser l'appareil dans son

ensemble et de mieux appréhender ses interactions complexes. La modélisation 3D facilite également l'analyse de l'ergonomie, la détection de potentiels conflits de conception, et offre une compréhension plus approfondie des performances dynamiques de l'appareil. En combinant la richesse visuelle de la modélisation 3D avec les données précises de la modélisation 2D, ce processus intégré élève la qualité du design, améliore la prise de décision et accélère le développement de solutions innovantes pour l'appareil. La figure 36 présente la modélisation 3D du circuit. La figure 36 nous montre le circuit complet du générateur.



**Figure 36:** Vue 3D du générateur

## **Chapitre 3 : Réalisation, maintenance et étude économique du générateur d'électrophorèse**

### **3.1. Introduction**

Le présent chapitre de cette étude se consacre à la phase cruciale de réalisation, de maintenance et d'étude économique du générateur d'électrophorèse. Après avoir défini les bases conceptuelles dans les chapitres précédents, cette section met l'accent sur la concrétisation de du projet en présentant en détail la mise en œuvre pratique du générateur. De plus, la question cruciale de la maintenance sera abordée en détaillant les procédures régulières pour garantir le bon fonctionnement et la durabilité du générateur. Enfin, une étude économique sera menée, évaluant les coûts associés à la réalisation, à l'exploitation et à la maintenance du générateur, fournissant ainsi une vision holistique du projet du point de vue financier. Ce chapitre constitue une étape essentielle pour traduire la vision théorique en une réalité pratique et économiquement viable.

### **3.2. Réalisation du générateur**

#### **3.2.1. Réalisation des groupes principaux**

Dans l'ensemble des différents modules que constitue le générateur, certains sont des éléments standards (Carte Arduino, transformateur, écran LC2 ...), mais d'autre sont à réaliser sur des plaquettes électroniques comme le convertisseur AC/DC. Par exemple, les différentes étapes pour la fabrication du convertisseur AC/DC sont :

- Conception du circuit sur la plaquette électronique en plaçant les composants de manière appropriée et en reliant les connexions selon le schéma du convertisseur AC/DC que vous souhaitez réaliser.
- Utilisation des outils de conception assistée par ordinateur (CAO) pour créer le schéma du circuit et le traçage des pistes sur la plaquette électronique. Ensuite, utilisation d'une méthode d'usinage ou de fabrication de circuits imprimés pour réaliser la plaquette.
- Assemblage des composants sur la plaquette électronique en suivant le schéma de conception pour assurer les bonnes connexions électriques.



- Une fois le montage terminé, effectuez des tests pour vérifier que le convertisseur AC/DC fonctionne comme prévu. Procédez au débogage si nécessaire pour corriger les éventuelles erreurs ou problèmes de fonctionnement.

### 3.2.2. Montage

Cette section détaille le processus de câblage du générateur, couvrant les connexions électriques essentielles entre les composants clés. L'accent est mis sur la logique de câblage, la sélection des matériaux conducteurs, et les précautions prises pour garantir une circulation électrique efficace tout en minimisant les risques. Il peut être résumé en trois étapes :

- **Cotations et découpage de plexiglass :** Le boîtier du générateur est une figure géométrique de forme parallélépipède rectangle de 30×30x15 cm de dimensions. Il a été réalisé à la main de façon empirique avec les outils usuels. Il en est de même pour la cuve d'électrophorèse qui est aussi en matière plexiglass transparent mais avec des séparations pour recevoir le tampon ou la solution de buffer (Sel).
- **Pose des éléments :** Il s'agit essentiellement de la pose et fixations de tous éléments ou composants qui entre en ligne de compte pour la réalisation de projet. Il s'agit des fixations, des perçages, de collage et soudure des tous les éléments entrant dans le cadre de la réalisation de ce projet.
- **Câblage proprement dit :** Cette étape est très délicate et a été réalisée suivant le schéma de la figure 35 et les techniques de câblage des armoires électriques. Pour y parvenir nous avons utilisé des fils souples de section bien définie non seulement pour la flexibilité du câblage mais aussi tenant compte de la sécurité d'exploitation nous avons limité notre courant à 500 mA et la puissance du transformateur fabriqué de 200 VA.

## 3.3. Résultats

### 3.3.1. Le transformateur

Afin de fabriquer le transformateur, les nombres de spires par enroulement et les sections des câbles, les différents résultats ci-dessous ont été obtenus.

### ❖ La tension primaire U1

La tension au primaire est de 220V. Elle correspond à la tension fournie au réseau au Bénin.

### ❖ La tension secondaire

La tension au secondaire varie. Trois niveaux ont été définis dans le cahier des charges. Soit  $U_{21} = 150 \text{ V}$ ,  $U_{22} = 220 \text{ V}$ ,  $U_{23} = 350 \text{ V}$

### ❖ La puissance apparente au primaire

$$S_1 = U_1 \times I_1$$

Pour la réalisation nous avons besoin des choix des sections de fils pour les bobinages du primaire et celui du secondaire. Alors en restant en concordance avec les règles de sécurité électrique suivant l'exploitation à laquelle serait soumise le produit, nous avons fixé le courant admissible  $I_2 = 0,7 \text{ A}$  avec  $U_2 \approx 360 \text{ V}$ .

$$S_2 = U_2 \times I_2$$

$$S_2 = 360 \times 0,7$$

$$S_2 = 250 \text{ VA}$$

Tenant compte des essais en charge nous avons approximativement un rendement  $\eta = 0,75$

$$\eta = S_2 / S_1 \quad S_1 = S_2 / \eta$$

$$S_1 = 250 / 0,75$$

$$S_1 = 333 \text{ VA}$$

$$S_1 = U_1 \times I_1 \rightarrow I_1 = S_1 / U_1$$

$$I_1 = 340 / 220$$

$$I_1 = 1,5 \text{ A}$$

$s_1$  la section du bobinage primaire et  $s_2$  la section du bobinage

Restant dans le respect des règles des sécurités sans pour autant créer trop de chute de tension nous avons fixé la densité du courant  $J = 2 \text{ A/mm}^2$

$$J_1 = I_1 / s_1 \rightarrow s_1 = I_1 / J_1$$

$$s_1 = 1,54 / 2$$

$$\underline{s_1 = 0,77 \text{ mm}^2}$$

$$J_2 = I_2 / s_2 \rightarrow s_2 = I_2 / J_2$$

$$\underline{s_2 = 0,35 \text{ mm}^2}$$

Calcul du nombre de tours pour chaque enroulement :

**Pour le primaire :**

$$N1 = U1 / (U2 \times N2)$$

$$N1 = 220V / (350V \times N2)$$

$$N1 = 0,6286 \times N2$$

**Pour le secondaire :**

$$N2 = U2 / (U1 \times N1)$$

$$N2_3 = 350V / (220V \times N1)$$

$$N2_2 = 220V / (220V \times N1)$$

$$N2_1 = 150V / (220V \times N1)$$

$$N2_3 = 1,5909 \times N1$$

$$N2_2 = N1$$

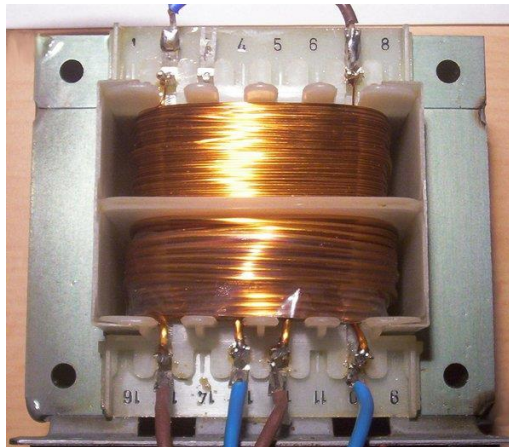
$$N2_1 = 0,681 \times N1$$

En prenant  $N1 = 100$  Spires, les enroulements du secondaire donnent :

$$N2_3 = 160$$

$$N2_2 = 100$$

$$N2_1 = 68$$



**Figure 37:** Transformateur réalisé et bobine intérieure [23]



**Figure 38:** Transformateur monophasé

### 3.3.2. Le générateur d'électrophorèse

La Figure ci-dessous représente le résultat d'un travail de recherche intensif, marqué par une concentration d'efforts intellectuels, physiques et financiers considérables. Le résultat se présentant sous la forme d'une figure parallélépipédique, n'est qu'un générateur d'électrophorèse conçu avec des organes disponibles localement en tenant compte des données expérimentales, des observations sur le terrain, des concepts théoriques et un raisonnement logique. Malgré les contraintes matérielles, un dispositif répondant aux exigences a été élaboré. L'ensemble des composants utilisés a été méticuleusement sélectionné pour leur pertinence et leur compatibilité avec les objectifs de recherche. Les nombreuses épreuves auxquelles le générateur a été soumis ont confirmé sa robustesse et son efficacité, assurant ainsi la fiabilité des résultats d'analyses obtenus.



*Figure 39: Photo du générateur*

## 3.4. Etude du coût de générateur

### 3.4.1. Généralités

L'estimation du coût d'un équipement consiste à évaluer les coûts engendrés de façon direct ou indirect dans la réalisation de du projet. Les couts indirects sont ceux liés au transport ou à la recherche sur le terrain pour l'identification et l'achat de matériels.

Couts directs sont ceux liés aux achats des matériels directement ou encore appelé coût conventionnel et la programmation.

### 3.4.2. Coût des éléments conventionnels

Les couts des différents éléments conventionnels entrant dans la fabrication du générateur sont indiqués dans le tableau suivant.

**Tableau 2:** Coût des éléments conventionnels

| N° | Désignations                   | Fonctions / observations                                            | Prix unitaire | Quantités | Montants (F CFA) |
|----|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------|-----------|------------------|
| 1  | Interrupteur                   | Coupure et rétablissement de la Tension                             | 1 000         | 1         | 1 000            |
| 2  | Port femelle d'alimentation AC | Connexion entre le chargeur et la tension du réseau conventionnelle | 5 000         | 1         | 5 000            |
| 3  | Câble d'alimentation           | Fiche                                                               | 3 000         | 1         | 3 000            |
| 4  | Filerie                        | Connexion et câblage des différents organes                         | 5 000         | 1         | 5 000            |
| 5  | Bornier                        |                                                                     | 100           | 12        | 1 200            |
| 6  | Vis                            |                                                                     | 1 000         | 1         | 1 000            |
| 7  | Porte fusible                  | Protection du circuit                                               | 800           | 1         | 800              |
| 8  | Ecran LCD                      | Affichage                                                           | 5 000         | 1         | 5 000            |
| 9  | Cable Arduino                  |                                                                     | 1 000         | 1         | 1 000            |
| 10 | Carte Arduino                  | Cerveau du générateur (Programme)                                   | 15 000        | 1         | 15 000           |
| 11 | Boutons poussoirs              | Organes de commande                                                 | 300           | 4         | 1 200            |
| 12 | LED                            | Voyant de signalisation                                             | 200           | 4         | 800              |
| 13 | Buzzer01                       | Avertisseur sonore                                                  | 4 000         | 1         | 4 000            |
| 14 | Module RTC                     | Garde mémoire                                                       | 4 500         | 1         | 4 500            |
| 15 | Transformateur élévateur       | Organe statique de transformation de courant                        | 38 000        | 1         | 38 000           |
| 16 | Vis de fixation                |                                                                     | 50            | 40        | 2 000            |

| N°           | Désignations           | Fonctions / observations             | Prix unitaire | Quantités      | Montants (F CFA) |
|--------------|------------------------|--------------------------------------|---------------|----------------|------------------|
| 17           | Colle de fixation      |                                      | 1 500         | 1              | 1 500            |
| 18           | Boitier du Générateur  | Enveloppe en plexiglass              | 20 000        | 1              | 20 000           |
| 19           | Bac d'électrolyse      | Enveloppe en plexiglass              | 8 000         | 1              | 8 000            |
| 20           | Electrodes             |                                      | 10 000        | 2              | 20 000           |
| 21           | Module relais 4 canaux | Organe de commutation                | 5 000         | 4              | 20 000           |
| 22           | Redresseur             | Système de transformation de courant | 5 000         | 1              | 5 000            |
| 23           | Batterie               | DC : 3-24v                           | 2 000         | 1              | 2 000            |
| 24           | Module I2c             |                                      | 1 500         | 1              | 1 500            |
| 25           | Alimentation 5 V       | Source de courant                    | 2 000         | 1              | 2 000            |
| <b>Total</b> |                        |                                      |               | <b>168 500</b> |                  |

Le coût total d'achat des éléments conventionnels est cent quatre trois milles neuf cents francs CFA, **Cv=168 500 F CFA**

### 3.4.3. Coût de réalisation

Le cout de la réalisation est lié au bac du boitier de générateur et de tous les éléments utilisés pour la pose, la fixation, le collage, le limage et l'ajustage.

**Tableau 3:** Coût de réalisation

| N°           | Opérations                            | Coûts (F CFA) |
|--------------|---------------------------------------|---------------|
| 1            | Formation du boitier principal        | 8 000         |
| 2            | Formation du boitier de l'électrolyse | 5 000         |
| 3            | Soudure des éléments électronique     | 5 000         |
| 4            | Fixation – Collage                    | 2 000         |
| 5            | Finition                              | 2 000         |
| <b>Total</b> |                                       | <b>22 000</b> |

Le coût de réalisation est au total vingt-deux mille francs CFA, **Cr = 22 000 FCFA**.

### 3.4.4. Coût de la conception

Le coût de la conception est crucial pour le succès d'un projet. Il ne s'agit pas juste d'esthétique mais aussi de fonctionnalité, d'utilisabilité et de satisfaction client. Des techniques comme la "Conception à coût objectif" et une planification minutieuse permettent de minimiser les coûts et de créer des produits performants et rentables.

Dans ce cas précis, il englobe les coûts de design, dimensionnement des éléments et la programmation du système.

**Tableau 4:** Coût de la conception

| N°           | Opérations                         | Coûts (F CFA) |
|--------------|------------------------------------|---------------|
| 1            | Conception du circuit électronique | 30 000        |
| 2            | Conception de la carrosserie       | 15 000        |
| 3            | Programmation du système           | 20 000        |
| <b>Total</b> |                                    | <b>65 000</b> |



Le coût de la conception est estimé à cinquante-cinq mille francs CFA, **Cc = 65 000 FCFA**.

### **3.4.5. Estimation du coût du générateur**

Il existe plusieurs méthodes pour estimer le cout global d'un équipement à partir du prototype. Selon la méthode de Lang [16], qui est une méthode ancienne et assez sommaire. Le coût total à estimer est obtenu en multipliant le somme des coûts des auxiliaires et principaux par un facteur modulaire global  $f$ .

$$C_g = f \cdot \sum \text{Coût}$$

$f$  dépend de l'équipement du résultant.

Le cout total du générateur fait la somme des couts de conception, réalisation et des éléments. Pour l'équipement, objet de cette étude,  $f=2,6$ . Le cout global donne donc :

$$\begin{aligned} C_g &= 2,6 * (Cv + Cc + Cr) \\ &= 2,6 * (168\,500 + 65\,000 + 22\,000) \\ &= 2,6 \times 255\,500 \end{aligned}$$

$$\mathbf{C_g = 664\,300\,FCFA}$$

Le cout de ce prototype est estimé à 664 300 FCFA. Dans une optique de production en plusieurs exemplaires (ou bien une fabrication en série), le coût est revenu à la baisse selon la quantité.

## **3.5. Maintenance du générateur**

### **3.5.1. Généralités**

L'ensemble des opérations d'entretien que peut subir ce type de matériel est généralement la maintenance préventive. Il a pour objectif de maintenir les éléments en état de fonctionner en toute sécurité. Il peut aussi quelque fois subir la maintenance corrective liée à une quelconque panne due au dysfonctionnement de l'un des composant ou éléments. Dans ce cas, la maintenance corrective permet de réparer ou de remplacer un élément défaillant afin de redonner toutes les qualités nécessaires au bon fonctionnement du générateur et à son utilisation.

### 3.5.2. Maintenance préventive

Les opérations de maintenance préventive possibles pour un générateur d'électrophorèse dépendent de sa marque, de son modèle et de son utilisation. Cependant, les opérations de maintenance préventive pour le générateur de cette étude sont regroupées en quatre groupes. Il y a le nettoyage, les vérifications, le calibrage et les tests. Le tableau ci-dessous donne les différentes opérations ainsi les périodicités associées.

**Tableau 5:** Maintenance préventive

| Activités de Maintenances               | Opérations                                                                                                                                                                                | Périodicités |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Nettoyage extérieur                     | Débrancher le générateur et le laisser refroidir.<br>Nettoyer l'extérieur du générateur avec un chiffon humide et un détergent doux.<br>Bien sécher le générateur avant de le rebrancher. | Hebdomadaire |
| Nettoyage intérieur                     | Ouvrir le boîtier du générateur<br>Retirer la poussière et les saletés à l'aide d'un aspirateur ou d'un chiffon sec.<br>Refermer le boîtier du générateur.                                | Mensuel      |
| Vérifications des câbles et connecteurs | Vérifier l'absence de dommages, de fissures ou d'usure.<br>Remplacer les câbles et connecteurs endommagés.                                                                                | Mensuel      |
| Vérification des fusibles               | Vérifier l'état des fusibles et les remplacer si nécessaire                                                                                                                               | Annuel       |

| Activités de Maintenances                | Opérations                                                                                                                                        | Périodicités |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Calibrage de la cellule d'électrophorèse | Vérifier que la cellule d'électrophorèse est propre et exempte de contamination.<br>Remplacer la cellule d'électrophorèse si elle est endommagée. | Annuel       |
| Test de fonctionnement                   | Effectuer un test de fonctionnement du générateur d'électrophorèse pour vérifier qu'il fonctionne correctement.                                   | Mensuel      |
| Test de performance                      | Effectuer des tests de performance pour vérifier que le générateur d'électrophorèse répond aux spécifications du fabricant.                       | Annuel       |

En plus de ces opérations générales, il est important de tenir un registre des opérations de maintenance préventive effectuées. Ce registre permettra de suivre l'état du générateur d'électrophorèse et de planifier les interventions de maintenance corrective. La maintenance préventive est essentielle pour garantir le bon fonctionnement et la longévité du générateur d'électrophorèse. En effectuant régulièrement les opérations de maintenance préventive, le risque de pannes et les réparations coûteuses sont réduites.

### 3.5.3. Pannes possibles et maintenances correctives

Les pannes possibles d'un générateur d'électrophorèse dépendent de plusieurs facteurs, tels que : la marque et le modèle du générateur, la fréquence d'utilisation du générateur, l'environnement dans lequel le générateur est utilisé. Les différentes pannes possibles pouvant advenir sur le générateur se résume dans le tableau ci-dessous avec les apports de solution y afférentes.

| Désignation de la panne                              | Causes possibles                                            | Actions                                 |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Plantage du programme                                | Variation du niveau de tension ou mauvais niveau de tension | Prévoir un stabilisateur ou un Onduleur |
| Bug du programme                                     |                                                             |                                         |
| Défaillance d'élément                                | Sous tension ou surtension                                  | Prévoir un stabilisateur ou un Onduleur |
| Non l'allumage du générateur                         | Perte de fusible                                            | Procéder au diagnostic et remplacer     |
| Générateur s'allume mais le programme ne démarre pas | Variation du niveau de tension ou mauvais niveau de tension | Reprogrammer                            |

### 3.6. Conclusion partielle

Ce chapitre a permis de passer de la théorie à la pratique en matière de générateur d'électrophorèse. Nous avons abordé les aspects essentiels de sa réalisation, en mettant l'accent sur la fabrication du convertisseur AC/DC sur des plaquettes électroniques, le câblage efficace, et les précautions de maintenance. De plus, l'étude économique nous a donné un aperçu complet des coûts associés à ce projet. En combinant la technologie, la gestion des coûts et la maintenance, ce chapitre jette les bases d'un générateur d'électrophorèse fonctionnel, durable et économiquement viable.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

La réalisation d'un générateur d'électrophorèse représente une étape significative dans le domaine de la biologie moléculaire et de la recherche scientifique. Ce mémoire a permis d'explorer en détail les différents aspects de la conception, de la construction et de l'optimisation d'un tel dispositif, ainsi que ses applications potentielles. L'objectif principal de ce travail était de concevoir un générateur d'électrophorèse efficace, fiable et abordable, répondant aux besoins spécifiques des laboratoires de recherche et des institutions académiques. À travers une méthodologie rigoureuse, nous avons abordé les différents aspects techniques, allant de la sélection des composants à la mise en œuvre des circuits électriques et électroniques.

Les résultats obtenus ont démontré la faisabilité de cette entreprise, avec la mise au point d'un générateur d'électrophorèse fonctionnel capable de produire des champs électriques précis et contrôlables pour séparer efficacement les molécules biologiques selon leur taille et leur charge. De plus, des tests approfondis ont été menés pour évaluer les performances du dispositif, notamment en termes de résolution, de vitesse et de reproductibilité des séparations.

En outre, ce mémoire a mis en lumière l'importance de l'accessibilité et de la modularité dans la conception de tels équipements. En développant un générateur d'électrophorèse adaptable et personnalisable, nous avons ouvert la voie à de multiples applications dans divers domaines de la biologie, de la médecine et de la recherche pharmaceutique.

En bref, la réalisation de ce générateur d'électrophorèse représente une avancée significative dans le domaine de la biologie moléculaire, offrant aux chercheurs et aux scientifiques un outil polyvalent et performant pour l'analyse et la séparation des molécules biologiques. Ce travail ouvre de nouvelles perspectives pour la recherche et la découverte dans de nombreux domaines, contribuant ainsi à l'avancement des connaissances et à l'innovation scientifique.

## Perspectives

La réalisation d'un générateur d'électrophorèse peut offrir plusieurs perspectives intéressantes dans divers domaines, notamment en sciences de la vie, en médecine et en recherche. Voici quelques-unes des perspectives qui découlent de cette réalisation :

- ❖ **Avancées en recherche biomédicale** : Les générateurs d'électrophorèse permettent de séparer et d'analyser les molécules biologiques telles que les acides nucléiques (ADN, ARN) et les protéines. Cela ouvre des perspectives pour la recherche fondamentale en biologie moléculaire, la génomique, la protéomique, etc. Les avancées dans ces domaines peuvent contribuer à une meilleure compréhension des maladies et à de nouvelles découvertes médicales.
- ❖ **Diagnostic médical** : Les techniques d'électrophorèse sont largement utilisées en diagnostic médical pour séparer et détecter des biomolécules spécifiques. La disponibilité de générateurs d'électrophorèse améliorés peut conduire à des avancées dans le diagnostic des maladies génétiques, des infections, des cancers et d'autres conditions médicales.
- ❖ **Développement de médicaments** : En permettant une analyse précise des molécules biologiques, les générateurs d'électrophorèse peuvent contribuer au développement de médicaments. Par exemple, ils peuvent être utilisés pour étudier l'interaction entre les médicaments candidats et leurs cibles biologiques, pour évaluer la pureté des composés chimiques, etc.
- ❖ **Applications en biotechnologie** : Les générateurs d'électrophorèse sont des outils essentiels dans de nombreuses applications biotechnologiques, telles que la production de produits pharmaceutiques, la biologie synthétique, la production d'enzymes et bien d'autres. Leur amélioration ouvre la voie à des techniques plus efficaces et plus précises dans ces domaines.
- ❖ **Diagnostic génétique et médecine personnalisée** : L'électrophorèse est utilisée dans le diagnostic génétique pour identifier les variations génétiques associées à des maladies. Des générateurs d'électrophorèse plus sophistiqués peuvent

contribuer à une meilleure analyse des profils génétiques individuels, ouvrant ainsi la voie à une médecine personnalisée basée sur le profil génétique des patients.

- ❖ **Développement de techniques analytiques avancées :** Les générateurs d'électrophorèse peuvent être intégrés à d'autres techniques analytiques, telles que la spectrométrie de masse ou la PCR (réaction en chaîne par polymérase), pour des analyses plus approfondies et plus complexes.

## Références Bibliographiques

- [1] SpiceTheme, "Electrophorèse," Chimieanalytique, 2019. [Online]. Available: <https://chimieanalytique.com/electrophorese/>. [Accessed 20 Octobre 2023].
- [2] Chimie Analytique, "Electrophorèse," septembre 2020. [Online]. Available: <https://chimieanalytique.com/electrophorese/>. [Accessed 15 Juin 2023].
- [3] F. F. Reuss, "Sur les lois de la décomposition électro-chimique," *Annales de chimie*, pp. 129-145, 1809.
- [4] SOCIMED, " Générateur électrique d'électrophorèse modèle Power Pro," SOCIMED, [Online]. Available: <https://www.socimed.com/generateur-electrique-d-electrophorese-modele-power-pro.html>. [Accessed 20 Octobre 2023].
- [5] avantor, "Power supply, PS 304 XL," vwr, 2020. [Online]. Available: <https://fr.vwr.com/store/product/18609989/power-supply-ps-304-xl>. [Accessed 22 Octobre 2023].
- [6] NANOPAC, "nanoPAC-300P Power Supply," Cleaver Scientific, 2004. [Online]. Available: <https://www.cleaverscientific.com/electrophoresis-products/nanopac-300-mini-power-supply/>. [Accessed 21 Octobre 2023].
- [7] EVERICH, "Jy300c Universal Power Supply," Nanjing Everich Medicare Import & Export, 2016. [Online]. Available: <https://www.everichmed.com/Jy300c-Universal-Power-Supply-model-300c-pd796461.html>. [Accessed 20 Octobre 2023].
- [8] Wikipédia, "Agarose," Wikipédia, [Online]. Available:



- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Agarose>. [Accessed 05 Novembre 2023].
- [9] M. I., "Techniques d'analyses Biochimiques et Moléculaire M2," Université Hassiba Benbouali de Chlef, Chlef, 2020.
- [10] Wikipédia, "Polyacrylamide," Wikipédia, 1 avril 2021. [Online]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Polyacrylamide>. [Accessed 2 novembre 2023].
- [11] takween.com, "Techniques d'analyse du protéome par électrophorèse bidimensionnelle. Introduction à la protéomique," biotech-ecolo.net, 2023. [Online]. Available: <https://www.takween.com/techniques/proteomique.html>. [Accessed 8 Novembre 2023].
- [12] B. N., "Techniques d'Analyses".
- [13] Medical Expo, "Générateur pour électrophorèse," Virtual Expo group, 2023. [Online]. Available: <https://www.medicalexpo.fr/prod/analytik-jena-gmbh-co-kg/product-83550-548021.html>. [Accessed 30 octobre 2023].
- [14] SI, "ALIMENTATION EN COURANT CONTINU".
- [15] H. Imed, "Les convertisseurs AC-DC et AC-AC," Institut supérieur des études technologiques de Nabeul, Nabeul.
- [16] Lang, "Evaluation des projets et estimation des coûts," 2020.
- [17] P. L. Panum, De electrophoreseos phaenomenis quaestiones nonnullae, 1837.
- [18] O. P., "High resolution two-dimensional electrophoresis of proteins," *Journal of biological chemistry*, vol. 250, no. 10, pp. 4007-4021, 1975.
- [19] W. K and O. M, "The reliability of molecular weight determinations by dodecyl

- sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis.," *Journal of biological chemistry*, vol. 244, no. 16, pp. 4406-4412, 1969.
- [20] T. A., "The moving-boundary method of studying the electrophoresis of proteins," *Biochimica et Biophysica*, no. 34, pp. 132-140, 1959.
- [21] T. A., "A new apparatus for electrophoretic analysis of colloidal mixtures," *Transaction of the Faraday Society*, no. 33, pp. 524-531, 1937.
- [22] Medical Expo, "Générateur pour électrophorèse," Analytik Jena GmbH+Co. KG, [Online]. Available: <https://www.medicalexpo.fr/prod/analytik-jena-gmbh-co-kg/product-83550-548021.html>. [Accessed 28 Août 2023].
- [23] W. MONTES QUIROZ and B. BOYER, "Protocole pour construire bobines et transformateurs," Mines-Albi, 2012.

## Table des matières

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Sommaire .....                                                                             | 2  |
| Dédicaces .....                                                                            | 3  |
| Remerciements .....                                                                        | 4  |
| Liste des figures .....                                                                    | 5  |
| Liste des tableaux .....                                                                   | 7  |
| INTRODUCTION GENERALE .....                                                                | 8  |
| Chapitre 1 : Généralités sur les générateurs d'électrophorèse .....                        | 9  |
| 1.1. Introduction.....                                                                     | 9  |
| 1.2. Introduction à l'électrophorèse.....                                                  | 9  |
| 1.2.1. Définition de l'électrophorèse .....                                                | 9  |
| 1.2.2. Principes fondamentaux de l'électrophorèse.....                                     | 10 |
| 1.2.3. Historique de l'électrophorèse.....                                                 | 11 |
| 1.3. Revue de la littérature .....                                                         | 12 |
| 1.3.1. Quelques types de générateurs d'électrophorèse .....                                | 12 |
| 1.3.2. Électrophorèse sur gel.....                                                         | 14 |
| 1.3.3. Électrophorèse capillaire .....                                                     | 15 |
| 1.3.4. Électrophorèse bidimensionnelle (2D) .....                                          | 16 |
| 1.3.5. Electrophorèse sur papier .....                                                     | 17 |
| 1.3.6. Autres types d'électrophorèse spécialisés (ex. électrophorèse en champ pulsé) ..... | 17 |

|                                                              |                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.4.                                                         | Générateurs d'électrophorèse .....                                     | 18 |
| 1.4.1.                                                       | Rôle des générateurs d'électrophorèse .....                            | 18 |
| 1.4.2.                                                       | Caractéristiques des générateurs d'électrophorèse .....                | 19 |
| 1.4.3.                                                       | Différents types de générateurs électrophorétiques .....               | 20 |
| 1.5.                                                         | Fonctionnement des générateurs d'électrophorèse.....                   | 20 |
| 1.5.1.                                                       | Généralité sur l'alimentation en courant continu.....                  | 20 |
| 1.5.2.                                                       | Alimentation par redresseur.....                                       | 21 |
| 1.5.3.                                                       | Alimentation par redressement commandé.....                            | 24 |
| 1.5.4.                                                       | Alimentation par convertisseur continu-continu.....                    | 26 |
| 1.5.5.                                                       | Systèmes de sécurité électrique .....                                  | 26 |
| 1.5.6.                                                       | Interfaces utilisateur et logiciels de contrôle .....                  | 27 |
| 1.6.                                                         | Conclusion partielle .....                                             | 28 |
| Chapitre 2 : Conception du générateur d'électrophorèse ..... |                                                                        | 29 |
| 2.1.                                                         | Introduction.....                                                      | 29 |
| 2.2.                                                         | Cahier de charge .....                                                 | 29 |
| 2.3.                                                         | Présentation et fonctionnement du générateur .....                     | 31 |
| 2.3.1.                                                       | Présentation du générateur.....                                        | 31 |
| 2.1.                                                         | Caractéristiques des éléments principaux.....                          | 33 |
| 2.1.1.                                                       | Détermination des paramètres du transformateur pour sa réalisation ... | 33 |
| 2.1.2.                                                       | Le convertisseur AC/DC.....                                            | 35 |

|                                                                                                |                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----|
| 2.1.3.                                                                                         | Alimentation continue de sortie.....         | 37 |
| 2.1.4.                                                                                         | Le module de relais de sélection.....        | 37 |
| 2.1.5.                                                                                         | Le système de contrôle / Carte Arduino ..... | 39 |
| 2.1.6.                                                                                         | Module RTC .....                             | 40 |
| 2.1.7.                                                                                         | L'écran LCD et Module I2C.....               | 42 |
| 2.2.                                                                                           | Elaboration des circuits du générateur.....  | 45 |
| 2.2.1.                                                                                         | Schéma électrique générale .....             | 45 |
| 2.2.2.                                                                                         | Vue 3D de la carte électronique.....         | 46 |
| Chapitre 3 : Réalisation, maintenance et étude économique du générateur d'électrophorèse ..... |                                              | 48 |
| 3.1.                                                                                           | Introduction.....                            | 48 |
| 3.2.                                                                                           | Réalisation du générateur .....              | 48 |
| 3.3.                                                                                           | Résultats.....                               | 49 |
| 3.3.1.                                                                                         | Le transformateur.....                       | 49 |
| 3.3.2.                                                                                         | Le générateur d'électrophorèse.....          | 52 |
| 3.4.                                                                                           | Etude du coût de générateur .....            | 52 |
| 3.4.1.                                                                                         | Généralités .....                            | 52 |
| 3.4.2.                                                                                         | Coût des éléments conventionnels.....        | 54 |
| 3.4.3.                                                                                         | Coût de réalisation .....                    | 56 |
| 3.4.4.                                                                                         | Coût de la conception .....                  | 56 |
| 3.4.5.                                                                                         | Estimation du coût du générateur .....       | 57 |

|                                  |                                                    |    |
|----------------------------------|----------------------------------------------------|----|
| 3.5.                             | Maintenance du générateur.....                     | 57 |
| 3.5.1.                           | Généralités .....                                  | 57 |
| 3.5.2.                           | Maintenance préventive.....                        | 58 |
| 3.5.3.                           | Pannes possibles et maintenances correctives ..... | 59 |
| 3.6.                             | Conclusion partielle .....                         | 60 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE.....         |                                                    | 61 |
| Perspectives .....               |                                                    | 62 |
| Références Bibliographiques..... |                                                    | 64 |